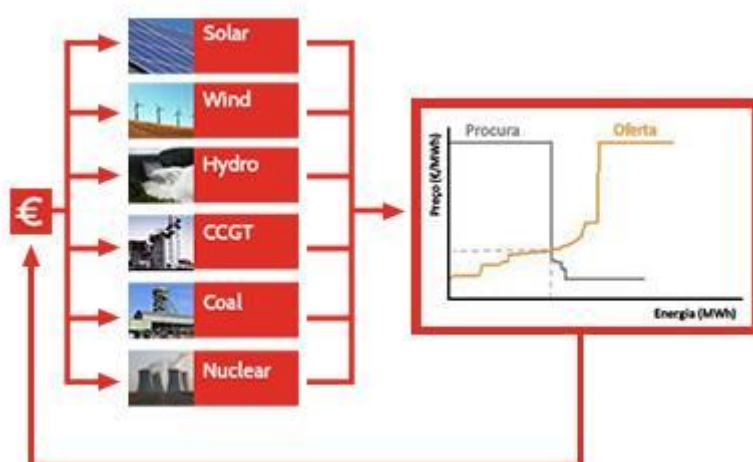




ISEL

**INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA**

**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação**



## **Estratégias de investimento em mercados liberalizados de energia elétrica**

**ANTÓNIO RAMALHO**

(Licenciado em Engenharia Eletrotécnica)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre  
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Energia

Orientadores:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Professor Paulo Trigo Cândido da Silva

Júri:

Presidente: Professor José Manuel Igreja (ISEL)

Vogais:

Professor Jorge Alberto Mendes de Sousa (ISEL)

Professora Maria Joana Vaz Pais (ISEG)

**Dezembro de 2014**



# **Agradecimentos**

Em primeiro lugar começo por agradecer aos meus orientadores, Professor Jorge de Sousa e Professor Paulo Trigo, pela disponibilidade, pela preciosa ajuda na definição do objeto de estudo, esclarecimento e sugestões dadas para o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também pelo todo apoio, colaboração e valiosos contributos científicos que me deram ao decorrer do período de realização da dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), mais propriamente aos professores da Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e Automação (ADESPA) pela formação, pela experiência e pelo conhecimento que me conferiram.

Aos meus pais, que me apoiaram e proporcionaram todas as condições para a concretização de todo o meu percurso académico.

Agradeço a todos os meus colegas e amigos mais próximos, em especial ao Fábio Marques, Jorge Carvalho, João Garrinhas, João Vilares e David Pereira entre outros, que aturaram-me e acompanharam-me durante todo este percurso académico e que contribuíram, sem dúvida, para o meu sucesso.

Por fim, agradeço a todas as outras pessoas que de forma direta ou indireta contribuíram para a realização deste trabalho.



# Resumo

Com a introdução da concorrência no setor de produção de eletricidade, o processo de decisão de investimento na geração de energia mudou drasticamente. Agora, os investimentos são a consequência de decisões individuais com o objetivo de maximizar o lucro da empresa. As decisões de investimento têm um forte impacto sobre os resultados a longo prazo de empresas de geração, pois estas determinam a sua carteira de geração futura com a exposição a certos fatores de risco tais como a evolução dos preços dos combustíveis e CO<sub>2</sub>, a evolução do consumo e da produção renovável, as alterações legislativas e regulatórias, entre outras.

Existem vários métodos utilizados por empresas e autoridades reguladoras, a fim de levar a cabo uma decisão de investimento eficiente. Um desses métodos, que é aquele em que esta dissertação se foca, é a utilização de modelos matemáticos, mais concretamente a Teoria de Jogos.

Neste contexto, o objetivo da presente dissertação é estabelecer uma metodologia para três estratégias de investimento (Estratégia 1 – custo específico de investimento, Estratégia 2 – custo médio no período corrente e Estratégia 3 – previsão do custo médio), onde recorrendo à Teoria de Jogos, se procuram os equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo e para um conjunto de estratégias desenvolvidas. Estas estratégias foram implementadas e experimentadas no simulador ITEM-Game.

Os resultados experimentais obtidos nas simulações efetuadas com o ITEM-Game, confirmam a existência de vários equilíbrios de Nash, que coincidem com a situação em que a potência total instalada no mercado, por todos os participantes, é despachada e satisfaz o consumo de energia. Em relação às estratégias propostas, constatou-se que não existe vantagem em utilizar a Estratégia 1, visto que a sua carteira de geração depende dos preços variáveis das suas fontes não renováveis, enquanto a Estratégia 3 tem melhores resultados aquando utilizada por um único participante.

**Palavras-chave:** Mercados de Energia Elétrica, Empresas de Geração, Estratégias de Investimento, Mercados Liberalizados, Quota de Mercado, Teoria de Jogos, Equilíbrio de Nash.



# Abstract

With the introduction of competition in the electricity production sector, the investment decision process in energy generation has changed dramatically. Now, investments are the result of individual decisions in order to maximize the company's profit. Investment decisions have a strong impact on long-term outcomes of generation companies, because they determine its future generation portfolio with exposure to certain risk factors such as fuel and CO<sub>2</sub> prices, power demand, renewable generation evolution, legislative and regulatory changes, among others.

There are several methods used by companies and regulatory authorities in order to carry out an efficient investment decision. One of these methods, which is where this thesis is focused, is the use of mathematical models, more specifically the Game Theory.

In this context, the thesis objective is to establish a methodology for three investment strategies (Strategy 1 - specific investment cost, Strategy 2 - average cost in the current period and Strategy 3 - average cost forecast), where using the Game Theory, it is intended to search for Nash Equilibriums for a set of target shares and a set of strategies developed. These strategies have been implemented and experimented in the simulator ITEM-Game.

The experimental results, gathered from the simulations performed with the ITEM-Game, confirm that there are several Nash Equilibriums, which match with the situation where the total installed capacity in the market by all participants, is dispatched and satisfies the power consumption. Regarding the strategies proposed, it was found that there is no benefit in using the Strategy 1, since their generation portfolio depends on the variable prices of its non-renewable sources, while Strategy 3 has better results when used by a single participant.

**Keywords:** Electricity Markets, Generation Companies, Investment Strategies Liberalized Markets, Market Share, Game Theory, Nash Equilibrium.





# Índice de conteúdos

Índice de conteúdos .....	i
Índice de figuras .....	iii
Índice de tabelas .....	v
Lista de acrónimos .....	vii
Nomenclatura .....	ix
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Enquadramento.....	3
1.2 Motivação e objetivos .....	4
1.3 Análise bibliográfica .....	6
1.4 Estrutura da dissertação.....	9
<b>2 Estado da arte.....</b>	<b>11</b>
2.1 Reestruturação mundial do setor de energia elétrica.....	13
2.1.1 Portugal e Espanha .....	13
2.1.2 Breve descrição do setor elétrico pelo resto do mundo .....	18
2.2 Modelos de mercado .....	25
2.2.1 Modelo em bolsa .....	26
2.2.2 Modelo contratos bilaterais .....	26
2.2.3 Modelo misto.....	27
2.3 Teoria dos jogos .....	28
2.3.1 Tipo de Jogos: simultâneo e sequencial .....	29
2.3.2 Equilíbrio de Nash.....	29
2.4 Síntese sobre estado da arte.....	30

<b>3</b>	<b>Modelo das estratégias de investimento em ativos de produção de energia elétrica ...</b>	<b>31</b>
3.1	Simulador ITEM-Game.....	33
3.1.1	Descrição .....	33
3.1.2	Decisões de investimento e comercialização .....	34
3.1.3	Modelos e resultados do simulador .....	35
3.1.4	Interface entre ITEM-Game e <i>Python</i> .....	38
3.2	Estratégias de investimento baseadas na quota de mercado.....	39
3.2.1	Estratégia 1 – custo específico de investimento .....	43
3.2.2	Estratégia 2 – custo médio da tecnologia no período corrente .....	44
3.2.3	Estratégia 3 – previsão dos custos médios .....	45
3.3	Estratégias de comercialização.....	47
3.4	Considerações em relação às estratégias propostas.....	48
<b>4</b>	<b>Simulações e resultados .....</b>	<b>49</b>
4.1	Pressupostos e variáveis em estudo.....	51
4.2	Simulação dos casos de estudo.....	53
4.3	Equilíbrio de Nash para conjunto de quotas de alvo .....	58
4.4	Equilíbrio de Nash para as diferentes estratégias de investimento.....	63
4.5	Análise dos resultados .....	69
<b>5</b>	<b>Conclusões e desenvolvimento futuro.....</b>	<b>75</b>
5.1	Principais aspetos e síntese de resultados.....	77
5.2	Desenvolvimento futuro.....	80
	Referências bibliográficas .....	81
	Anexo A – Tutorial de simulação .....	A-1
	Anexo B – Exemplo de aplicação do modelo descrito no capítulo.....	B-1
	Anexo C – Artigo desenvolvido para a conferência internacional EEM14 .....	C-1

# Índice de figuras

Fig. 2.1.1.1 – Setor elétrico em Portugal. Adaptado de [19]. .....	14
Fig. 2.1.1.2 – Cadeia de valor da energia elétrica no regime de mercado liberalizado. Adaptado de [22]. .....	16
Fig. 2.1.1.3 – Quotas dos agentes na península ibérica no ano de 2011 e 2012 [24]. ....	17
Fig. 2.1.1.4 – Quotas de: a) Geração de Eletricidade; b) Comercialização de Eletricidade [24]. .....	17
Fig. 2.2.1.1 – Curvas de oferta e procura num mercado <i>spot</i> . .....	26
Fig. 3.1.1.1 – <i>Interface</i> gráfica do Simulador ITEM-Game para as decisões de investimento. ....	33
Fig. 3.1.2.1 - Exemplo da agregação das curvas de oferta e de procura no ITEM-Game. ....	35
Fig. 3.1.4.1 - Processo de interação entre o ITEM-Game e as estratégias implementadas. ....	38
Fig. 3.1.4.1 – Fluxograma do algoritmo. ....	42
Fig. 3.2.3.1 – Períodos de simulação considerados. ....	52
Fig. 3.2.3.1 – Resultado da simulação em que cada jogador tem uma quota alvo de 25%: a) Potência total instalada, consumo e preço de fecho de mercado; b) Custos médios das tecnologias em cada período com marcação de qual marcou o preço de fecho; c) Evolução dos preços de combustíveis e emissões ed CO <sub>2</sub> ; d) Volumes de combustíveis consumidos e de emissões de CO <sub>2</sub> ; e) Potência instalada pelo jogador 1; f) Potência instalada pelo jogador 2 3 4; g) Quota de mercado atingida por cada jogador; h) Lucro obtido por cada jogador. ....	54
Fig. 3.2.3.1 – Valores de quotas alvo de cada jogador para cada teste realizado. ....	59

Fig. 3.2.3.2 – Traçado da fronteira de Pareto com valores obtidos na Tabela 3.2.3.1 em que a cor de fundo de cada ponto corresponde à quota alvo utilizada pelo jogador 2|3|4 e a cor da borda corresponde à quota alvo do jogador 1. .... 60

Fig. 3.2.3.1 – Resultado da simulação em que cada jogador tem uma quota alvo de 25%, onde o jogador 1 utiliza a estratégia 3 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2: a) Potência total instalada, consumo e preço de fecho de mercado; b) Custos médios das tecnologias em cada período com marcação de qual marcou o preço de fecho; c) Evolução dos preços de combustíveis e emissões ed CO<sub>2</sub>; d) Volumes de combustíveis consumidos e de emissões de CO<sub>2</sub>; e) Potência instalada pelo jogador 1; f) Potência instalada pelo jogador 2|3|4; g) Quota de mercado atingida por cada jogador; h) Lucro obtido por cada jogador. .... 64

# Índice de tabelas

Tabela 2.2.3.1 – Modelo utilizado no simulador ITEM-Game .....	27
Tabela 3.1.2.1 – Características das diferentes tecnologias de geração disponíveis para investimento no ITEM-Game .....	34
Tabela 3.2.1.1 – Ordem de mérito: custo específico de investimento de cada tecnologia .....	43
Tabela 3.2.3.1 – Preços iniciais de combustíveis e de emissões de CO <sub>2</sub> .....	51
Tabela 3.2.3.1 – Decisões do jogador 1: a) investimento; b) comercialização .....	55
Tabela 3.2.3.2 - Decisões do jogador 2 3 4: a) investimento; b) comercialização .....	56
Tabela 3.2.3.1 – Resumo de resultados tendo em conta o lucro dos jogadores para diferentes quotas alvo .....	58
Tabela 3.2.3.2 – Investimento no período inicial para cada quota alvo .....	62
Tabela 3.2.3.1 – Resumo de resultados tendo em conta o lucro dos jogadores para diferentes estratégias com quota alvo de 25% .....	63
Tabela 3.2.3.2 – Investimento no período inicial para cada quota alvo .....	63
Tabela 3.2.3.3 – Decisões do jogador 1: a) investimento; b) comercialização .....	65
Tabela 3.2.3.4 - Decisões do jogador 2 3 4: a) investimento; b) comercialização .....	66
Tabela 3.2.3.5 – Resultados do último período de cada simulação .....	68



# Lista de acrónimos

AEEG	<i>Autorità per l'energia elettrica e il gas</i>
AEMO	<i>Australian Energy Market Operator</i>
AER	<i>Australian Energy Regulator</i>
AMF	<i>Autorité des Marchés Financiers</i>
BETTA	<i>British Electricity Trading and Transmission Arrangements</i>
BTN	Baixa Tensão Normal
CCGT	<i>Combined Cycle Gas Turbine</i>
CE	Comissão Europeia
CMVM	Comissão do Mercado de Valores Mobiliários
CNE	<i>Comisión Nacional de Energía</i>
CNMV	<i>Comisión Nacional del Mercado de Valores</i>
CRE	<i>Commission de Régulation de L'énergie</i>
DERA	<i>Danish Energy Regulatory Authority</i>
EDF	<i>Électricité de France</i>
EDP	Energias de Portugal
EEX	<i>European Energy Exchange AG</i>
EI	<i>Energy Markets Inspectorate</i>
EMV	<i>Energy Market Authority</i>
ENEL	<i>Ente Nazionale per l'energia ELettrica</i>
ERO	<i>Energy Regulatory Office</i>
ERSE	Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos
EXAA	<i>Energy Exchange Austria</i>
FERC	<i>Federal Energy Regulatory Commission</i>
GME	<i>Gestore Mercato Elettrico</i>
ITEM-Game	<i>The Investment and Trading in Electricity Markets Game</i>
LMP	<i>Local Marginal Price</i>
MIBEL	Mercado Ibérico de Eletricidade
NEMMCO	<i>National Electricity Market Management Company</i>

## *Lista de acrónimos*

NETA	<i>New Electricity Trading Arrangements</i>
NVE	<i>Norwegian Water Resources &amp; Energy Directorate</i>
OMEL	Operador de Mercado Ibérico polo Espanhol
OMIP	Operador de Mercado Ibérico polo Português
PJM	<i>Pennsylvania Jersey Maryland Interconnection</i>
PRE	Produção em Regime Especial
PURPA	<i>Public Utility Regulatory Policies Act</i>
REE	<i>Red Eléctrica de Espanha</i>
REN	Redes Energéticas Nacionais
RTE	<i>Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité</i>
RWE	<i>Electricity Transport Grid</i>
SEI	Sistema Elétrico Independente
SEN	Sistema Elétrico Nacional
SENV	Sistema Elétrico Não Vinculado
SEP	Sistema Elétrico de Serviço Público
XML	<i>Extensible Markup Language</i>



# Nomenclatura

## Índices

$i$	Tipo de tecnologia: Nuclear, CCGT, Carvão, Hídrica, Eólica ou Solar
$t$	Período de simulação

## Variáveis

$A$	Valor de quota alvo pretendido pela empresa de geração, $A \in [0;1]$ ;
$A_{\text{jog1}}$	Quota alvo pretendida pelo jogador 1
$A_{\text{jog234}}$	Quota alvo pretendida pelo jogador 2 3 4
$C_t$	Custos da empresa de geração
$C_{i,t}^{\text{CO2}}$	Custos de emissões de $\text{CO}_2$
$C_{i,t}^{\text{Comb}}$	Custos de combustíveis
$C_{i,t}^{\text{inv}}$	Custos de investimento
$C_{i,t}^{\text{M}}$	Custos médios
$C_i^{\text{W}}$	Custo específico de investimento
$D_t$	Consumo de energia
$\text{DC}_{i,t}$	Decisão de Comercialização
$\text{DI}_{i,t}$	Decisão de Investimento
$I_i$	Valor de investimento de uma única unidade
$L_t$	Lucro da empresa de geração
$N$	Número de jogadores
$n$	Número de tecnologias operacionais
$n_{i,t}$	Número de tecnologias do tipo $i$
$n_{i,t}^{\text{I}}$	Número de tecnologias referente ao investimento do tipo $i$
$n_{i,t}^{\text{P}}$	Número de tecnologias referente à capacidade do tipo $i$
$O_t$	Orçamento da empresa de geração
$\text{OP}_i$	Períodos de operação
$P_i$	Capacidade nominal

## *Nomenclatura*

$P_{i,t}$	Capacidade operacional
$P_t^A$	Potência Alvo
$P_{i,t}^{desp}$	Potência despachada
$P_t^{Op}$	Capacidade total operacional
$Q_{i,t}$	Quantidade de potência oferecida
$R_t$	Receita da empresa de geração
$SE_i$	Emissões específicas de CO <sub>2</sub>
$V_t^{CO_2}$	Volume de emissões de CO <sub>2</sub>
$V_t^{Comb}$	Volume de combustível consumido
$\alpha^{CO_2}$	Fator multiplicativo associado às emissões de CO <sub>2</sub>
$\alpha^{Comb}$	Fator multiplicativo associado aos combustíveis
$\Delta P$	Diferença entre a potência alvo e o somatório da potência investida
$\eta_i$	Rendimento
$\pi_{i,t}$	Preço oferecido
$\pi_t^{CO_2}$	Preço das emissões de CO <sub>2</sub>
$\pi_0^{CO_2}$	Preço inicial das emissões de CO <sub>2</sub>
$\pi_t^{Comb}$	Preço de combustível
$\pi_0^{Comb}$	Preço inicial de combustível
$\pi_t^{pfm}$	Preço de fecho de mercado

# Capítulo 1

---

## Introdução

*Neste capítulo é realizada uma introdução ao tema abordado na presente dissertação. Apresenta-se o enquadramento do estudo efetuado, a motivação para abordar o tema selecionado e a análise bibliográfica. É apresentada ainda, a estrutura do texto adotada na dissertação.*



## 1.1 Enquadramento

A organização típica do setor elétrico, até à década de 80, era baseada em empresas verticalmente integradas responsáveis por todas as funções do mercado (i.e. produção, transporte, distribuição e gestão do mercado). Esse modelo de monopólio ao longo dos anos tem sido alterado através da liberalização do setor. O processo de liberalização verifica-se em diversos países, como por exemplo, Noruega, Suécia, Alemanha, Inglaterra, Estados Unidos, e também em Portugal, cuja liberalização do mercado ficou completa em 4 de setembro de 2006<sup>1</sup>.

Essencialmente, esta reestruturação originou a separação das diferentes atividades da indústria, nomeadamente a atividade de produção (geração) das atividades de transmissão e distribuição, permitindo a concorrência do setor elétrico num mercado livre. Estas reformas foram destinadas a reforçar a eficiência económica global da indústria e, portanto, permitindo reduções de preços para os consumidores finais.

A liberalização dos mercados de energia elétrica trouxe dificuldades e oportunidades aos agentes do mercado, nomeadamente aos agentes vendedores de energia (onde há mais competição), uma vez que o aumento da complexidade e da competitividade no novo modelo de mercado (modelo em bolsa)<sup>2</sup> eleva também a necessidade de compreender as interações entre os vários participantes e a sua influência no comportamento emergente do mercado [1].

Neste contexto criaram-se novas oportunidades e desafios para os diversos agentes do setor, nomeadamente ao nível da partilha de risco, na medida em que as empresas produtoras e comercializadoras assumem cada vez mais os riscos inerentes às suas decisões de investimento e comercialização. Portanto, é cada vez mais importante a definição de estratégias de investimento e comercialização que tenham em consideração não só o retorno esperado mas também o risco assumido [2].

Em particular, as decisões de investimento têm um forte impacto sobre os resultados a longo prazo de empresas de energia elétrica, pois estas determinam a sua carteira de

---

<sup>1</sup> Em 4 de setembro de 2006 concretiza-se a última etapa da liberalização do mercado de eletricidade em Portugal, a partir da qual cerca de 6 milhões de clientes passaram a poder escolher o seu fornecedor de energia elétrica [62].

<sup>2</sup> Neste mecanismo de curto prazo pretende-se equilibrar a produção e o consumo através de propostas apresentadas pelas entidades produtoras, por um lado, e pelos comercializadores e consumidores por outro, veja-se em pormenor no capítulo 2.2.1.

geração futura com a exposição a certos fatores de risco tais como a evolução dos preços dos combustíveis e CO<sub>2</sub>, a evolução do consumo e da produção renovável, as alterações legislativas e regulatórias, entre outras [3].

## 1.2 Motivação e objetivos

Com a evolução crescente do sistema elétrico e o aumento da sua complexidade, cada vez mais o seu estudo e a sua modelação se tornam importantes, por forma a melhorar este sistema a nível técnico e a nível económico e ambiental. Com a recente liberalização do setor elétrico, o mercado de energia tornou-se mais competitivo, exigindo às companhias comercializadoras de energia estratégias de mercado mais completas e eficientes.

O aumento da competitividade entre produtores de energia elétrica pode levá-los a inovarem e a funcionarem de forma mais eficiente e económica, de modo a maximizarem o seu lucro. A inovação pode levar à diminuição dos preços e a uma melhor utilização dos recursos energéticos.

Esta nova organização eleva também a tomada de decisão humana no ajustar das estratégias comerciais dos ativos da energia, pois o agente não tem informação suficiente para avaliar o impacto das suas ações no mercado, podendo estas ter um efeito contrário ao pretendido e trazer grandes perdas ao agente [1].

A transformação do setor elétrico foi também possível por causa da presunção convencional de que os mecanismos de mercado permitem uma maior eficiência na atribuição dos recursos de geração a curto prazo, bem como na alocação dos investimentos de capital. Na verdade, os investimentos da geração são responsáveis pela maior parte das despesas de capital no setor da eletricidade e reconhece-se que os ganhos e as oportunidades potenciais para redução de custos previstos com a liberalização do mercado são em grande parte associadas à eficiência do investimento a longo prazo na capacidade de geração [4].

Embora os ciclos de investimento pareçam ser da sabedoria convencional sobre o comportamento a longo prazo dos mercados de energia, não há nenhum esforço sistemático para desenvolver modelos para compreender a dimensão deste fenómeno.

Os modelos económicos oferecidos pela teoria neoclássica são, essencialmente orientados para o estudo dos pontos de equilíbrio dos sistemas económicos, procurando a sua otimização. No entanto, a condição para a existência, singularidade e estabilidade de tais pontos de equilíbrio são aspetos em grande parte ignorados [5].

Na maioria dos casos, o desenvolvimento de sistemas económicos assume-se como uma sequência de pontos de equilíbrio ideais, uma vez que os mecanismos de mercado presumem-se robustos e fortes o suficiente para restaurar o equilíbrio sempre que este for alterado. Por esta razão, os modelos de equilíbrio não descrevem adequadamente os ciclos de investimento muitas vezes verificados nos mercados reais. Na verdade, algumas características estruturais presentes nos mercados de energia atuais como atrasos e não-linearidades, são frequentemente simplificados ou completamente ignorados nos modelos atuais a longo prazo. Portanto, um dos principais problemas no ambiente competitivo é a falta de ferramentas matemáticas adequadas para a modelagem e análise de desenvolvimento de longo prazo dos mercados de energia [5].

Portanto, a motivação para a presente dissertação é mitigar as dificuldades encontradas pelos agentes do mercado elétrico na decisão de investimento nesta nova configuração do mercado.

Esta dissertação tem como objetivo o estabelecimento de uma metodologia e análise de estratégias de investimento de uma empresa do setor elétrico, onde utilizando a teoria de jogos, pretende-se encontrar equilíbrios de Nash para um conjunto de estratégias. Estas estratégias serão implementadas e experimentadas numa plataforma de simulação existente, *The Investment and Trading in Electricity Markets Game* (ITEM-Game) [6].

A plataforma, ITEM-Game, é um simulador interativo do mercado de energia elétrica. Este é composto por diversos participantes (jogadores), que irão investir em centrais de energia elétrica, negociar licitações e analisar resultados deste mercado [7]. Este simulador será abordado em pormenor no capítulo 3.1.

Por fim, é importante referir que elaborou-se um artigo (veja-se Anexo C) para a Conferência Internacional EEM14 (*European Energy Market 2014*), da qual se retiraram algumas conclusões sobre as estratégias desenvolvidas, nomeadamente a consequência dos preços dos combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub>, o valor de quota alvo e a influência da limitação no orçamento nos resultados dos participantes.

### 1.3 Análise bibliográfica

O processo de decisão de investimento na geração de energia mudou drasticamente com a introdução da concorrência no setor de produção de eletricidade. Agora, os investimentos são a consequência de decisões individuais com o objetivo de maximizar o lucro da empresa. Sob o contexto da liberalização, os investimentos na geração enfrentam novos riscos, que não podem ser suportados pelos consumidores finais.

Após a liberalização do setor de energia elétrica, os investimentos e as desclassificações de centrais de geração são uma consequência da descentralização, sendo as decisões comerciais feitas por várias empresas autónomas e não pelo resultado de um planeamento de expansão otimizada de forma centralizada. Deste modo, a decisão de investir em novas centrais enfrenta novas incertezas. Ao contrário do ambiente regulado, a tomada de decisão dos participantes de mercado é guiada por *feedbacks* de preços e por uma visão imperfeita das condições futuras do mercado que eles vão enfrentar [8].

Além disso, as empresas de geração têm novas tarefas de planeamento de longo prazo relacionadas com a análise de risco e outros objetivos estratégicos (de quota de mercado alvo e análise da estratégia dos concorrentes). Não são garantidas receitas futuras através das tarifas reguladas uma vez que as empresas são recompensadas por um preço incerto pela energia vendida. Sendo assim, a capacidade das empresas de geração para vender energia depende agora da sua competitividade de custos em relação aos seus concorrentes, uma vez que estas empresas só têm informação sobre a sua carteira de geração. A impossibilidade de passar os riscos de investimento para os consumidores finais torna necessário internalizá-los na decisão de investimento [8].

O principal objetivo a cumprir pelas empresas de geração no mercado liberalizado é a maximização do lucro. Outros objetivos mais estratégicos e específicos podem ser adicionados como por exemplo, obter uma quota objetivo de mercado, para investir num determinado tipo de tecnologia ou numa carteira de geração diversificada, de modo a transmitir uma imagem corporativa em particular para os consumidores, a fim de se proteger contra o risco ou para manter a estrutura financeira dentro de alguns limites [9].



As maiores incertezas no novo ambiente de mercado levam os investidores a escolher projetos de geração com base em tecnologias mais flexíveis e com menores custos de investimento. Além disso, as incertezas do mercado tornam importantes as centrais de geração com menor tempo de construção. Estas circunstâncias, juntamente com outras, como a redução dos custos de investimento, o rápido progresso na eficiência térmica, bem como as crescentes preocupações ambientais e as novas reservas de gás têm favorecido as centrais de gás (CCGT). Devido à sua flexibilidade, os projetos tendo por base as tecnologias CCGT são os preferidos pela maioria dos investidores de energia. De facto, a capacidade instalada em CCGT tem a maior taxa de crescimento entre todas as tecnologias térmicas com quase 20% ao ano. Além disso, a maior parte da “nova” capacidade de energia adicionada nos próximos 25 anos em todo o mundo é com base nesta tecnologia de geração [10].

Os riscos a longo prazo enfrentados pelos investimentos em energia na indústria reestruturada encurtaram os horizontes de planeamento para recuperar os investimentos. Os mercados de capitais e investidores de energia exigem retornos significativamente maiores sobre os investimentos do que no ambiente regulado. As taxas de desconto que refletem o custo de oportunidade ajustado ao risco do capital aumentaram de 4-5% antes da liberalização até 11-15% com a introdução da concorrência. Portanto, as tecnologias intensas em capital, mas com custos operacionais mais baratos, como carvão, nuclear e hídrica são agora economicamente desvantajosas quando comparadas com projetos que descontam essas taxas mais elevadas [11].

Tendo em conta que as decisões de investimento são da responsabilidade de empresas privadas, são necessários modelos para lidar com as duas principais características da nova reestruturação: em primeiro lugar, a maior incerteza; em segundo, o facto dos sistemas liberalizados trabalharem em ambientes competitivos, onde cada empresa tem as suas próprias decisões, influenciando as decisões dos outros participantes.

Uma das principais técnicas que analisa os mercados e os seus concorrentes é a Teoria de Jogos. Esta técnica traduz-se como um modelo teórico que lida com as situações em que diferentes jogadores têm uma certa oposição aos seus interesses, tomando-se decisões de modo a que os resultados obtidos por cada um não dependam apenas das suas próprias decisões, mas também das dos outros. Estas situações podem ser definidas como jogos, que podem ser resumidas como um conjunto de funções que, para o

conjunto de decisões dos jogadores, têm como resultado os lucros de cada um deles. Os mercados de energia elétrica podem ser representados como jogos competitivos, em que um conjunto de agentes interage repetidamente ganhando informações (jogos sequenciais) ou não (jogos simultâneos).

Dada a definição acima, o Equilíbrio de Nash [12] de um jogo é definido como o conjunto de decisões, de modo a que nenhum dos jogadores melhore o seu lucro alterando as suas decisões de forma unilateral. Para estabelecer um equilíbrio ótimo num mercado de energia elétrica, é necessária, além das funções de custos das tecnologias, uma função que relacione o preço de mercado e procura. Sendo assim, um jogo é definido quando as variáveis de decisão determinam as decisões de investimento e de operação. Existem diferentes formulações para definir o equilíbrio. Os principais são: Modelo de Bertrand, onde as variáveis de decisão são os preços [13]; Cournot, onde estas variáveis são as quantidades [14]; Stackelberg, quando há um líder que decide as suas quantidades e o resto decide tendo em conta as decisões do líder [15]. Para resolver cada uma destas formulações, podem ser utilizadas diferentes técnicas matemáticas., sendo que as mais conhecidas são: métodos iterativos e programação matemática com restrições de equilíbrio.

Na Teoria dos Jogos, os modelos utilizados podem ser caracterizados por serem sequenciais (dinâmicos) ou simultâneos (estáticos). O modelo de jogos sequenciais é associado ao planeamento a longo prazo, sendo o seu uso limitado a problemas de pequena dimensão. Modelo de jogos simultâneos têm a vantagem de permitir lidar com problemas muito maiores, mas a sua representação é mais adequado para o problema de planeamento de operação, isto é, decidir a produção de cada central de energia num horizonte temporal de curto ou médio prazo [9].

Em [16] é realizada uma breve revisão dos primeiros modelos utilizados na Teoria dos Jogos, em que estes são usados para resolver o problema do planeamento a longo prazo da produção de energia. Nesta referência, são propostos três novos modelos. O primeiro modelo assume um perfeito equilíbrio competitivo. O segundo modelo é estendido ao modelo de Cournot e pode ser interpretado como a descrição de novos investimentos num mercado oligopolista onde a capacidade é construída e vendida simultaneamente em contratos de longo prazo. O terceiro modelo separa o investimento da decisão de venda.

Outras abordagens são realizadas em [17] e [18]. O modelo em [17] propõe um equilíbrio simultâneo, onde são consideradas duas hipóteses (Cournot e Stackelberg) e o modelo em [18] faz uma representação de dois níveis do equilíbrio, onde é considerado um jogo repetitivo pela repetição de equilíbrios simultâneos.

## **1.4 Estrutura da dissertação**

A presente dissertação é constituída por cinco capítulos. O atual capítulo apresenta uma introdução sucinta dos aspetos gerais da dissertação, indicando os principais temas abordados e expondo as motivação e os objetivos que se pretendem atingir. Neste capítulo é também realizada uma análise bibliográfica sobre o tema.

No Capítulo 2 é abordado o estado da arte, onde se descreve de forma breve a reestruturação do setor elétrico a nível global, centrando-se no entanto principalmente na Península Ibérica. São também abordados os modelos de mercado e é introduzida a teoria de jogos, esta que é a utilizada como base para as simulações realizadas.

No Capítulo 3, introduz-se o simulador utilizado, ITEM-Game, realçando-se as suas principais características e os seus algoritmos. É também descrita a metodologia das estratégias de investimento na qual se propõem três estratégias para a tomada de decisão.

No Capítulo 4 enuncia-se quais os pressupostos e variáveis de estudo nas simulações. São também apresentados e analisados os resultados obtidos através das simulações das quais se obtiveram equilíbrios de Nash.

O Capítulo 5 apresenta as principais conclusões resultantes do trabalho realizado e são indicados os tópicos que podem ser abordados em trabalho futuro.



## Capítulo 2

---

### Estado da arte

*No presente capítulo é abordada a concepção de Mercados de Energia Elétrica, incidindo na reestruturação a nível global do setor elétrico. O foco principal deste trabalho é o desenvolvimento de estratégias de investimento Mercado de Energia Elétrica liberalizado. Visto que a área de aplicação consiste nos Mercados de Energia Elétrica, torna-se necessário explorar um pouco mais este domínio. Assim, este capítulo também descreve, de forma sucinta, alguns tipos de modelos de mercados, colocando a ênfase no modelo em bolsa. De seguida, o capítulo apresenta um dos temas com mais relevância para a presente dissertação, nomeadamente a Teoria de Jogos, indicando a sua definição. Por fim, é realizada uma síntese a este capítulo.*



## 2.1 Reestruturação mundial do setor de energia elétrica

A liberalização do setor energético e mais em particular da eletricidade introduziu uma nova estrutura ao mercado, que anteriormente se apresentava verticalizado. Na Europa a publicação da diretiva europeia 92/96/CE e nos Estados Unidos da América a publicação do PURPA – *Public Utility Regulatory Policies Act* em 1978 constituíram os primeiros marcos políticos relevantes para a liberalização dos mercados de eletricidade.

A diretiva 92/96/CE foi criada com o principal objetivo de liberalizar o mercado na produção, contudo o mercado a retalho<sup>3</sup> manteve-se em regime de monopólio regulado.

O segundo esforço na liberalização dos mercados de eletricidade deu-se com a implementação da diretiva europeia 2003/54/CE, que teve como principal objetivo efetivar a liberalização dos segmentos grossista<sup>4</sup> e retalhista.

O terceiro passo na liberalização dos mercados deu-se pela consagração da diretiva europeia 2009/72/CE, que define novas linhas de orientação para o mercado interno de eletricidade, tornando clara a posição dos vários intervenientes no mercado, e incrementando assim, o nível de liberalização, mantendo um sistema universal regulado, com acesso aos consumidores finais sob determinadas condições.

De acordo com a normalização indicada anteriormente foi adotado um desenho de mercado particular nos diferentes países ou zonas, alguns dos quais passam a ser seguidamente descritos.

### 2.1.1 Portugal e Espanha

Em Portugal, o setor elétrico iniciou a abertura do mercado em 1988, tendo sido permitido a produção independente usando fontes renováveis ou cogeração. Em 1995, foi estabelecido um novo modelo organizacional do Sistema Elétrico Nacional (SEN), constituído pelo Sistema Elétrico de Serviço Público (SEP), que consiste num comprador único, e pelo Sistema Elétrico Independente (SEI), que compreende o Sistema Elétrico Não Vinculado (SENV) e a Produção em Regime Especial (PRE) [19].

---

<sup>3</sup> Mercado em que os retalhistas asseguram o fornecimento aos consumidores finais [60].

<sup>4</sup> Segmento em que os agentes produtores de eletricidade fornecem o resultado da sua produção aos retalhistas presentes na comercialização de eletricidade [61].

Em 4 de setembro de 2006, foi concretizada a última etapa da liberalização do mercado de eletricidade, a partir da qual os clientes passaram a poder escolher o seu fornecedor de energia elétrica [20]. Na Fig. 2.1.1.1 é apresentado o modelo da nova organização do setor elétrico nacional.

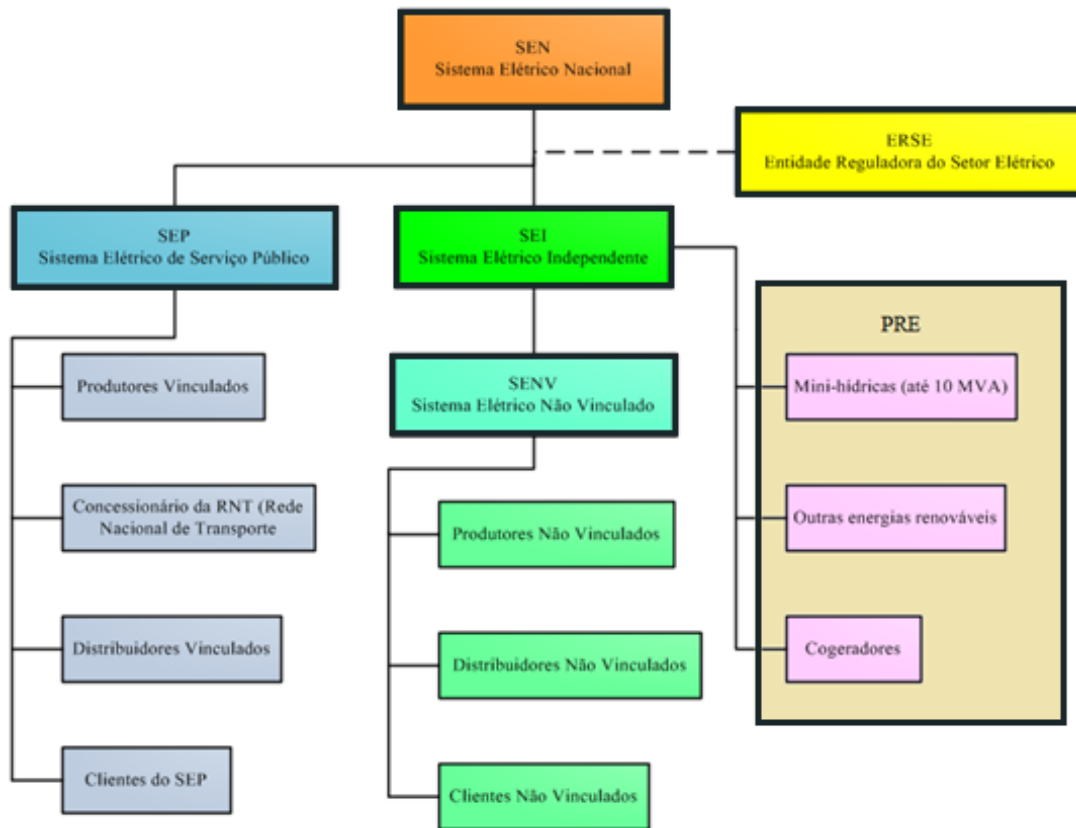


Fig. 2.1.1.1 – Setor elétrico em Portugal. Adaptado de [19].

Atualmente, o mercado liberalizado e o mercado regulado competem em simultâneo, possibilitando que todos os clientes negoceiem contratos de energia no mercado liberalizado, ou continuem no mercado regulado, e pagarem as Tarifas de Venda a Clientes Finais (definidas pela ERSE) [21].

Em Portugal e Espanha, entrou em vigor o MIBEL – Mercado Ibérico de Eletricidade a 1 de julho de 2007, que passou a permitir que todos os clientes sejam elegíveis, ou seja, possam escolher livremente o seu fornecedor de energia elétrica. Foi adotada uma estrutura que estabelece o mercado organizado através de mercados a prazo e *spot*, e



através de contratação bilateral, que permite o relacionamento direto entre produtores e comercializadores, ou produtores e consumidores [21].

A entidade responsável pelos contratos a prazo (Futuros e *Forwards*) é o OMIP – Operador de Mercado Ibérico polo Português, que conta com 49 membros registados em dezembro de 2013. Os contratos negociados nesta bolsa podem ter períodos de semanas, meses, trimestres ou anos do tipo carga base, ou carga de ponta. Os contratos futuros podem-se ainda dividir em dois tipos, uns com entrega física e outros com uma liquidação no vencimento puramente financeira. Quanto ao mercado diário e intradiário, a entidade responsável por este tipo de negociação é o OMEL – Operador de Mercado Ibérico polo Espanhol [21].

Na regulação do mercado de eletricidade existem quatro figuras independentes, que são a ERSE – Entidade Reguladora dos Serviços Energéticos e CMVM – Comissão do Mercado de Valores Mobiliários em Portugal, a CNE – *Comisión Nacional de Energía*, e a CNMV – *Comisión Nacional del Mercado de Valores* em Espanha [21].

No MIBEL existem dois operadores de sistema e transporte de energia, que são a REN – Redes Energéticas Nacionais em Portugal, e a REE – *Red Eléctrica de España*, em Espanha [21].

A detentora, em grande parte, da rede de distribuição em Portugal é a EDP – Energias de Portugal, enquanto em Espanha existem várias empresas tais como Iberdrola, Endesa, Unión Fenosa, Hidrocontábrico e E.On [21].

Na comercialização atuam no mercado Espanhol empresas como a Iberdrola, Endesa, Union Fenosa, E.On, Hidrocontábrico, Fevasa e Solanar. Em Portugal a Iberdrola, Endesa, Union Fenosa, Hidrocontábrico também estão presentes mas a grande quota de mercado pertence à EDP. Na Fig. 2.1.1.2 é apresentada a nova organização dos setores da indústria no regime de mercado liberalizado em Portugal [21].

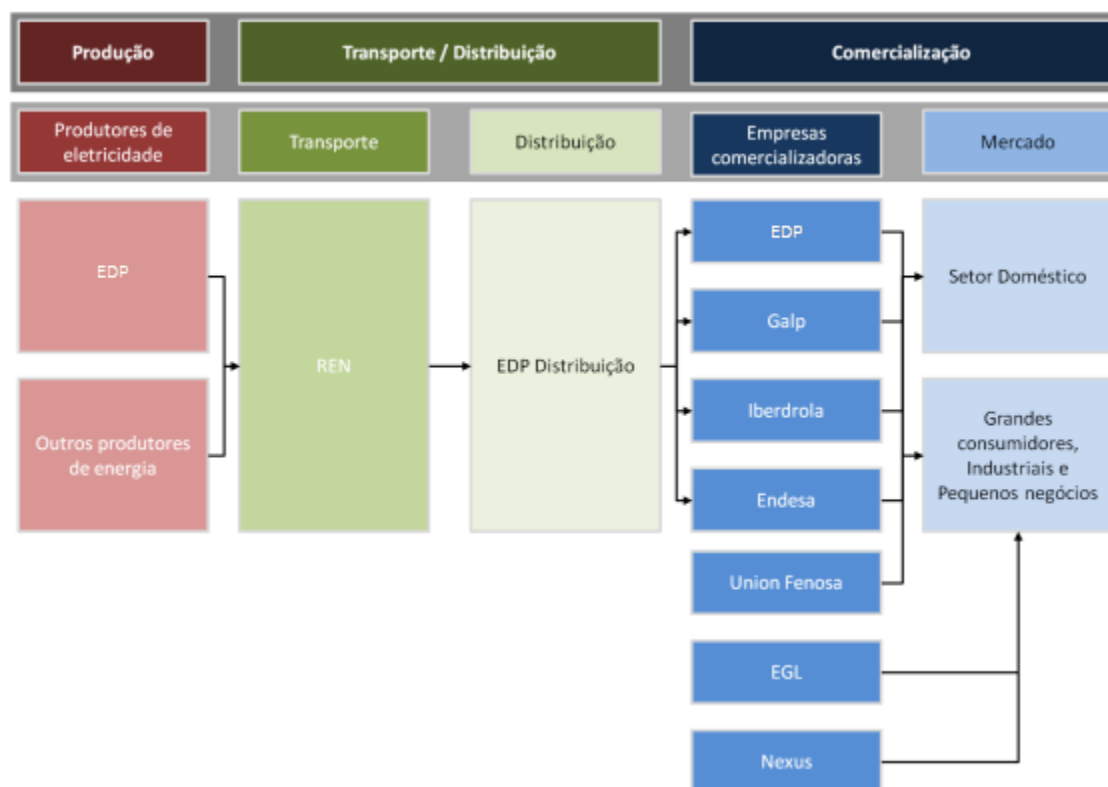


Fig. 2.1.1.2 – Cadeia de valor da energia elétrica no regime de mercado liberalizado. Adaptado de [22].

De acordo com os relatórios mensais apresentados pelo regulador do mercado energético Português (ERSE), verifica-se que desde maio de 2013 até maio de 2014, o número de consumidores no mercado livre cresceu 64% (alcançou um número acumulado de 2 827 mil clientes em maio de 2014), a uma taxa média mensal de 4,2%. Em maio de 2014, a EDP Comercial manteve a sua posição como principal operador no mercado livre em número de clientes (cerca de 86% do total de clientes) e em consumos (cerca de 46% dos fornecimentos no mercado livre), ou seja, a EDP detinha uma elevada quota de mercado comparada com as restantes participantes [23]. Em relação às quotas de geração e comercialização em Portugal e Espanha, nas Fig. 2.1.1.3 e Fig. 2.1.1.4 é possível observar quais as quotas dos agentes na península ibérica.

%	2011	2012	$\Delta(p.p.)$
<b>Geração de Eletricidade - PRO (TWh)</b>	<b>200</b>	<b>188</b>	
Endesa	30%	34%	3
Iberdrola	25%	22%	-3
EDP	16%	14%	-2
Gas Natural Fenosa	18%	18%	0
Outros	11%	12%	1
<b>Comercialização de Eletricidade Regulada (TWh)</b>	<b>90</b>	<b>76</b>	
Endesa	31%	32%	1
Iberdrola	25%	24%	-1
EDP	31%	31%	0
Gas Natural Fenosa	11%	11%	0
Outros	1%	1%	0
<b>Comercialização de Eletricidade Livre (TWh)</b>	<b>215</b>	<b>225</b>	
Endesa	33%	32%	-1
Iberdrola	23%	23%	-1
EDP	14%	13%	-1
Gas Natural Fenosa	13%	13%	-1
Outros	16%	19%	3
<b>Comercialização de Gás Natural Convencional (TWh)<sup>(1)</sup></b>	<b>298</b>	<b>314</b>	
Endesa	16%	16%	0
Iberdrola	6%	5%	-1
EDP	11%	9%	-2
Gas Natural Fenosa	40%	43%	3
Galp	10%	10%	0
Outros	17%	17%	0

(1) Valores de 2012 estimados para comercialização em Portugal da Iberdrola, Gas Natural Fenosa e Outros

Fig. 2.1.1.3 – Quotas dos agentes na península ibérica no ano de 2011 e 2012 [24].

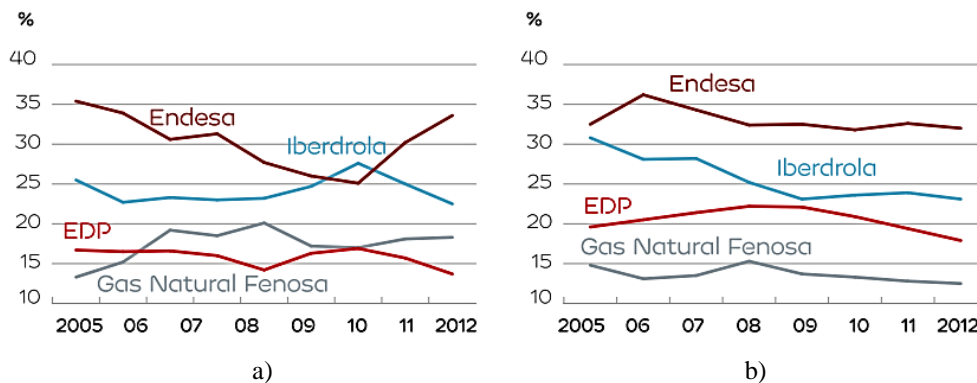


Fig. 2.1.1.4 – Quotas de: a) Geração de Eletricidade; b) Comercialização de Eletricidade [24].

Ao nível do mercado organizado constata-se um valor superior no preço da energia de Portugal em relação a Espanha, após *Market Splitting*, devido às diferentes tecnologias de produção utilizadas em cada país para cobrir a respetiva procura considerando a capacidade de interligação existente [21].

### 2.1.2 Breve descrição do setor elétrico pelo resto do mundo

- **Inglaterra e País de Gales**

Até 1989, o setor elétrico de Inglaterra e Gales correspondia a um modelo verticalmente integrado e monopolista. No ano de 1990, foi criada a primeira bolsa a nível mundial onde era possível um encontro do lado da oferta e do lado da procura. Esta bolsa tinha uma organização de tipo obrigatório, ou seja a estrutura era composta por um comprador único [25].

Ainda na década de 90 iniciou-se a implementação da liberalização do setor, de forma gradual para os industriais e comerciais, culminando em 1998 com os consumidores domésticos, no entanto, tal medida não se revelou tão eficaz como pretendido no contexto da competitividade de mercado, ficando a descida de preços da energia um pouco aquém do esperado pelos consumidores [25].

O organismo regulador de Inglaterra e Gales (Ofgem) decidiu adotar medidas no sentido de transformar a estrutura da bolsa num mercado simétrico, ou seja, de forma a existir licitações quer de oferta quer de procura, com um caráter voluntário, e com o objetivo principal do aumento da competitividade no mercado grossista, introduzindo em março de 2001 a nova reforma do sistema elétrico denominado de NETA – *New Electricity Trading Arrangements* [25].

Mais recentemente, a 1 de abril de 2005 entrou em vigor a reforma BETTA 20 - *British Electricity Trading and Transmission Arrangements*, que estende os objetivos da reforma NETA à Escócia, resultando daí alguns benefícios para os consumidores e produtores de energia elétrica desse país. A legislação BETTA permite que a Inglaterra, Gales e Escócia tenham um sistema elétrico uniformizado, deixando a Escócia de ter as duas principais operadoras de transporte “*Scottish Power*” e a “*Scottish and Southern Energy*”, para passarem ambos a um único operador de sistema/transporte que é a *National Grid Transco*, complementado com a rede de distribuição que é dividida por 14 operadores [26].

Em 2011, verifica-se que o Reino Unido depende bastante dos combustíveis fósseis para a produção de energia elétrica, pois a tecnologia térmica clássica ocupa 78% da capacidade total instalada [27].

- **Países Nórdicos**

O primeiro mercado multinacional de energia elétrica do mundo foi o *NordPool*, onde intervêm os países do Conselho Nórdico com a exceção da Islândia. A Noruega foi o país pioneiro do processo tendo a Suécia encetado um processo idêntico pouco tempo depois. Também a Finlândia, Dinamarca, Estónia, Letónia e Lituânia participam neste mercado. Em janeiro de 2010 foi criado um novo mercado, N2EX, que adiciona ao *NordPool* contratos de energia do Reino Unido. Em 2013 existiam 361 empresas de 20 países que negociam no *NordPool* [28].

O início do processo norueguês teve lugar em 1991 com a entrada em vigor do *Energy Act* que preconizava a liberalização dos subsectores da produção e da distribuição, pondo fim à integração vertical das empresas. O único subsector que continuou a ser encarado como um monopólio natural foi o do transporte. A nova legislação visava o desenvolvimento do sistema elétrico norueguês através da criação dum mercado concorrencial onde atuassem produtores e compradores de energia. No seguimento das alterações impostas pelo *Energy Act*, o estado norueguês criou uma empresa que passou a explorar a rede de transporte, a *Statnett*, e outra vocacionada para o subsector da produção, a *Statkraft* [29].

A *NordPool* é assim composta pela *Elspot* e *Elbas* no mercado da eletricidade. O *Elspot* é a entidade responsável pela negociação contínua para as 24 horas do dia seguinte (*Day-Ahead*). A *Elbas* é responsável pela negociação em mercado intradiário, até uma hora antes da entrega física. Para a cobertura de risco existe a *NordPool Derivatives* onde é possível negociar Opções, CfD's – *Contract for Difference*, e *Forwards*. Para além destes produtos, é ainda possível estabelecer contratos bilaterais diretamente com o produtor [29].

Existem neste mercado quatro entidades reguladoras, que são a DERA – *Danish Energy Regulatory Authority* da Dinamarca, EI – *Energy Markets Inspectorate* da Suécia, NVE – *Norwegian Water Resources & Energy Directorate* da Noruega, e a EMV – *Energy Market Authority* da Finlândia. Os operadores de sistema/transporte são igualmente quatro, a Energinet, Svenska Kraftnät, Statnett SF e Fingrid, pertencentes à Dinamarca, Suécia, Noruega e Finlândia respetivamente [28].

Este mercado, comparativamente com outros mercados europeus, apresenta um preço diário em bolsa tipicamente inferior. Isto deve-se em parte à tecnologia usada na

produção de eletricidade que tem uma forte componente hídrica e nuclear. Em 2011, segundo o regulador Norueguês, as centrais hídricas, num ano com precipitação normal, são suficientes para a produção de 95,3% do consumo interno de eletricidade que chegam a atingir os 123,9 TWh. A Noruega é o sexto maior produtor de energia elétrica a partir de recursos hídricos no mundo, sendo o país pertencente à *NordPool* que mais quota de produção hídrica tem instalado em 2008 seguindo-se a Suécia. A Dinamarca é o país que menos tem destaque neste tipo de produção pois tem apenas 10 MW instalados no mesmo ano, o que se revela quase residual. A segunda maior fonte de energia é a nuclear, onde a Suécia e a Finlândia se apresentam como principais produtores [30].

- **França**

O mercado Francês começou a sua liberalização a partir do princípio do ano 2000, tal como estava estipulado na primeira diretiva europeia de 1996. A regulação do setor é exercida por dois organismos, a CRE – *Commission de Régulation de L'énergie* na pasta da energia, e o AMF – *Autorité des Marchés Financiers* como supervisor do mercado regulado e dos contratos OTC. Em 30 de julho de 2001 entrou em funcionamento a *Powernext SA*, onde pode ser negociada energia em mercado organizado ou através de futuros [31].

Em França existem vários agentes ao nível da produção e comercialização, mas é de facto a EDF – *Électricité de France* que tem maior poder de mercado nos dois segmentos [32].

Existem onze empresas distribuidoras de energia, como sejam a *Electricité de Strasbourg* e a *Gaz et Electricité de Grenoble*, mas é a EDF que mais uma vez tem a maior quota de mercado [33].

A gestão do sistema, assim como a rede de transporte estão a cargo da RTE – *Gestionnaire du Réseau de Transport d'Electricité* [34].

No ano 2012 foram injetados na rede 570 TWh de energia, dos quais 369 TWh foram diretamente negociados entre produtores e consumidores. Quer isto dizer que apenas 36% da energia foi negociada em bolsa [35].

Ao nível dos mercados de futuros, em 2012, foram negociados 494 TWh que é um valor 26% acima do consumo interno Francês. O maior volume de transações de contratos negociados é de curto prazo, o que demonstra alguma relutância por parte dos agentes de assumir uma posição de longo prazo [35].

Em janeiro de 2013, a França apresentava uma potência instalada ligeiramente superior a 128 GW, contribuindo em grande parte para este valor a tecnologia nuclear que contabiliza 64 GW, seguindo-se as térmicas clássicas e a hídrica com aproximadamente 25 GW instalados respetivamente [35].

- **Alemanha**

Na Alemanha, a liberalização dos mercados do gás e da eletricidade começaram em 1998, mas só em 2005 com a publicação do *Energy Act* foi possível uma liberalização mais efetiva, tendo em conta as diretivas europeias [36].

A transparência do mercado está a cargo do regulador *Bundesnetzagentur für Elektrizität, Gas, Telekommunikation, Post und Eisenbahnen* – com abreviatura de BNetzA que monitoriza a lei interna alemã sobre os mercados energéticos – *German Energy Act*. O mercado alemão ao nível da geração tem como maiores agentes a RWE e a E.On [37].

A rede de transporte existente é dividida por quatro operadores de sistema/transporte que são a *Vattenfal Europe Transmission*, a RWE – *Electricity Transport Grid*, E.On *Netz* e a *EnBW Transport Grid* [37].

Em 2002 foi criada a EEX – *European Energy Exchange AG*. Esta bolsa não só transaciona ativos para entrega em território Alemão, mas também em zonas em que o operador de rede seja a RTE (França), a *Swissgrid* (Suíça), ou a *Austrian Power Grid* (Áustria). A energia pode ser comprada no mercado diário através de blocos de ofertas com carácter *standard* para diferentes períodos horários [38].

Mais recentemente, em 2008, foi fundada a *EEX Derivatives Market*, na qual é possível negociar através de futuros e opções [39]. A EEX conta atualmente com 250 agentes registados de 24 países diferentes, que atuam no mercado *spot* e/ou no mercado de derivativos [40].

A potência instalada atinge o valor de 173 TW no ano 2012, contribuindo em grande parte para este número a tecnologia térmica clássica, eólica, solar e nuclear com 89 TW, 29 TW, 31 TW e 12 TW respetivamente [37].

- **Itália**

Mercado italiano da eletricidade resulta de Decreto Legislativo n.º 79 de 16 de março de 1999 (Decreto Legislativo 79/99), que transpõe a diretiva europeia relativa ao mercado interno da eletricidade (96/92/CE) para a legislação nacional [41].

O mercado italiano é dominado predominantemente pelo grupo ENEL – *Ente Nazionale per l'energia Elettrica*, que detém, entre centrais térmicas e renováveis, perto de 37 GW de potência instalada [42]. Existem ainda outros agentes emergentes tais como a *Edison Group*, *Endesa Italia SpA* e o Grupo ENI. As importações da França, Suíça, Áustria, Eslovénia e Grécia perfazem um valor de 14% da procura de eletricidade. Tem como principal fonte de produção de eletricidade a energia térmica, onde cerca de 60% da geração é feita a partir destas tecnologias, o que faz com que este mercado dependa em grande parte dos combustíveis fósseis, e é possivelmente devido a este fator que se verifica um preço de eletricidade em bolsa superior a outros mercados europeus [43].

A operação do sistema/transporte é assegurada pela *Terna SpA*, e a distribuição está a cargo da *Enel Distribuzione*. A regulação e supervisão de mercado são efetuadas pela AEEG – *Autorità per l'energia elettrica e il gas* [43].

Tal como os diversos mercados europeus, também a Itália permite a escolha do fornecedor de energia (comercializador) a todos os consumidores desde julho de 2007, ainda assim, os consumidores domésticos e pequenos negócios continuam a ser setores dominados pela ENEL [44].

A entidade responsável pela negociação de energia é a GME – *Gestore Mercato Elettrico*. Nesta bolsa é possível negociar em mercado organizado ou através de *forwards*. Atualmente existem 237 empresas registadas como participantes na GME [45].

Este país caracteriza-se pela potência instalada em tecnologia térmica clássica, que chega a atingir valores superiores a 70 TW [44].



- **Áustria**

Com a liberalização do mercado elétrico austríaco em 1 de outubro de 2001 foi necessário algum tempo para que em 19 de março de 2002 a EXAA – *Energy Exchange Austria*, se afirmasse no mercado europeu de produtos energéticos. O mercado foi iniciado com 12 participantes e, neste momento, EXAA *Spot Trading* inclui mais de 78 agentes de mais de 16 países. No ano 2013 foram transacionados em mercado organizado perto de 9300 GWh, e no ano 2014 decresceu ao valor 7900 GWh [46].

A E-Control é a responsável pela supervisão do mercado energético, que transportou nas redes de eletricidade 60 608 GWh no ano 2013. Estes valores demonstram que grande parte da energia não passa através do mercado organizado, possivelmente devido à forte verticalização do setor elétrico [47].

Quer a produção, quer a rede de transporte e distribuição é propriedade pública, contrastando com a maior parte dos países que tem estes sistemas geralmente privatizados [48].

A principal empresa de produção é a *Österreichische Elektrizitätswirtschafts-AG (Verbund)*, seguindo-se de nove centrais provincianas: BEWAG, EVN, ESTAG, Energie AG, KELAG, SAFE, TIWAG, VKW e WIENSTROM. Estas pequenas empresas são suficientes para produzirem 95% da eletricidade injetada na rede pública [49].

A rede de transporte é dividida em três zonas, através de três empresas distintas, a APG (100% subsidiária da *Verbund*), TIWAG Netz AG (100% subsidiária da TIWAG) e a VKW.

As redes de distribuição pertencem a nove empresas que se dividem por diferentes áreas. Existem ainda pequenas redes de distribuição (municípios), o que perfaz cerca de 130 operadores de distribuição em todo o país [50].

- **Polónia**

Em 1997 começou a ser publicada a primeira normalização no sentido da liberalização do setor, mas foi só no ano 1999 que se concretizou a implementação de um operador de mercado [51].

É através da *Towarowa Gięlda Energii S.A* que é possível negociar energia elétrica em mercado organizado e estabelecer contratos futuros. No entanto a energia transacionada por este meio é quase residual, ficando a maior percentagem para os contratos bilaterais [51].

O sistema elétrico assume uma estrutura quase vertical, uma vez que as duas maiores empresas de eletricidade do país (PKE SA e a BOT-GiE SA) integram as áreas da produção, transporte, distribuição e comercialização. Ao contrário de outros países da Europa, a Polónia opta por ter o sistema elétrico maioritariamente nacionalizado [52].

A *Energy Regulatory Office* (ERO) é a entidade responsável neste país, pela regulação do setor elétrico [52].

- **Austrália**

A NEMMCO – *National Electricity Market Management Company* foi fundada em 1996, para além de operador de mercado exerce também competências na operação de sistema. O preço do mercado organizado é diferenciado em cinco regiões – Queensland, New South Wales, Victoria, Tasmânia e Sul da Austrália. Neste mercado não são admitidos contratos bilaterais. É assim considerado um mercado obrigatório, uma vez que todas as licitações são dadas à bolsa. A partir de 1 de julho de 2009, a NEMMCO cessou operações passando o seu papel e responsabilidade para um novo operador de mercado, o AEMO - *Australian Energy Market Operator* [53].

A AER – *Australian Energy Regulator*, é a entidade competente pela supervisão do mercado que transaciona mais de 199 TWh (ano 2012-13) e que depende bastante do carvão e do gás como matéria-prima para a produção de eletricidade [54].

- **Estados Unidos da América**

Nos Estados Unidos, dada a dimensão do país e sua divisão em vários estados, o processo de reestruturação teve um desenvolvimento não uniforme, existindo uma grande diversidade de estruturas, sistemas tarifários e condições de acesso às redes. As primeiras iniciativas neste sentido começaram em estados como a Califórnia, Massachusetts, Rhode Island, Nova Iorque, Pensilvânia, Maine e New Jersey, em

simultâneo com a definição de regulamentos e regras de mercado pela *Federal Energy Regulatory Commission* (FERC) [55].

A competição a nível de retalho foi introduzida em 1998 nos estados de Massachusetts, Rhode Island e Califórnia, alargando-se a doze estados até ao final do ano 2000. Após o arranque inicial, o processo sofreu um abrandamento por volta do ano 2000. Aspectos como a crise elétrica na Califórnia, a falência da Enron, a volatilidade dos preços de mercado, o aumento dos preços em alguns estados, o *blackout* de 2003, entre outros contribuem para que alguns estados questionem a vantagem deste tipo de reformas ou prefiram aguardar pela demonstração de que tais reformas trarão benefícios reais aos consumidores [56].

No entanto, a maioria dos estados a Nordeste, alguns estados do centro Leste, o estado do Texas e a FERC continuam a reestruturação do mercado no sentido de o fazer funcionar bem [56].

A *Pennsylvania Jersey Maryland Interconnection* – PJM é o operador que atua em diversos estados da costa Atlântica dos EUA, nomeadamente Pensilvânia, New Jersey, Maryland, Delaware e Virgínia e 13 distritos da Columbia. É atualmente responsável pela alimentação de energia elétrica a 19% da população dos EUA, ou seja, 61 milhões de pessoas através da produção e transporte de mais de 794 GWh/ano (2013) [57].

A PJM tem ainda funções de monitorização e controlo do sistema, assim como de planeamento e despacho de geradores de para serviços auxiliares. Devido à grande extensão da rede é calculado o LMP – *Local Marginal Price*, que inclui o custo da energia mais o custo pela ocorrência de congestionamentos. Neste mercado não são admitidos contratos bilaterais. Tal como na Austrália este é também considerado um mercado obrigatório [56].

## 2.2 Modelos de mercado

De modo a aumentar a eficiência destes mercados liberalizados, foram criados modelos para mitigar os erros humanos na parte da negociação do produto. Os dois modelos de mercado que se destacam mais, são o modelo em bolsa e o modelo dos contratos bilaterais, existindo ainda mais um modelo que é uma mistura destes dois que é designado por modelo misto [21].

### 2.2.1 Modelo em bolsa

O modelo em bolsa, ou modelo *pool*, está implementado, de uma forma geral, em todos os países que possuem um mercado liberalizado. É caracterizado por ser um leilão duplo, onde o operador de mercado agrega as licitações de venda/procura, e é constituído por um mercado *spot*<sup>5</sup> onde vendedores e compradores submetem ofertas de pares quantidade-preço pela energia que desejam negociar em mercado, e funciona normalmente no dia anterior àquele em que será implementado o resultado das propostas de compra/venda. A *Pool* ao receber estas ofertas agrega-as em duas curvas, uma para a venda e outra para a compra, segundo uma ordem de mérito.

Nas ofertas de venda a ordem de mérito é da mais barata para a mais cara, nas ofertas de compra é da mais cara para a mais barata. No ponto de interseção destas duas curvas é retirado o preço de fecho de mercado, ao qual toda a quantidade de energia até esse ponto é casada (vendida e comprada), como mostra a Fig. 2.2.1.1.

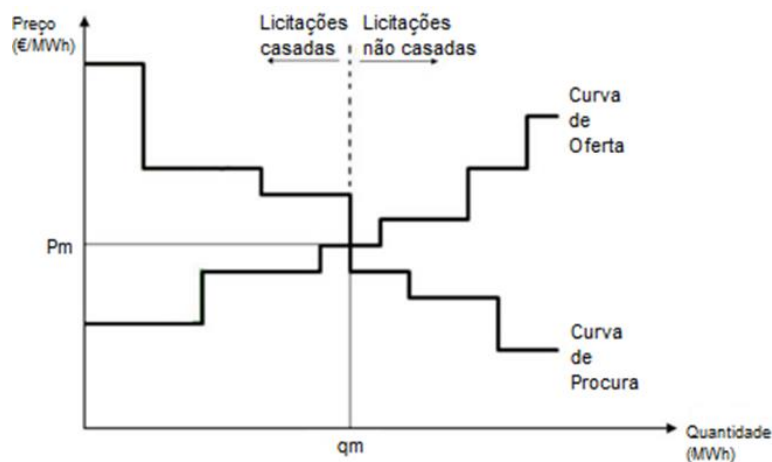


Fig. 2.2.1.1 – Curvas de oferta e procura num mercado *spot*.

### 2.2.2 Modelo contratos bilaterais

Os contratos bilaterais surgem de forma a estabilizar os preços do mercado. São contratos realizados diretamente entre duas entidades, com preços, termos e condições negociados livremente.

<sup>5</sup> O termo *spot*, é um usado para designar mercados onde se negocia ativos para entrega imediata, em contraste com os mercados onde se negocia ativos para entrega futura, designados por mercados a prazo.

Podem ser distinguidos dois tipos de contratos bilaterais, os físicos e os financeiros, com particularidades distintas. Os contratos bilaterais físicos são executados normalmente a longo prazo, estabelecidos entre duas partes, onde uma parte compromete-se a colocar a energia elétrica na rede (vendedor) e a outra parte recebe a energia elétrica contratada (comprador). Os preços e condições do contrato são negociáveis. É um modelo que garante segurança em relação ao preço, uma vez que este é fixado para um longo período de tempo.

Os contratos bilaterais financeiros fornecem um seguro contra a volatilidade referente aos mercados de energia, uma vez que os preços em mercados competitivos reagem rapidamente às variações da oferta e procura. Para garantir a segurança das partes envolvidas, devido ao risco inerente ao mercado, podem ser aplicados vários modelos de contratos, incluindo contratos por diferenças, de futuro e de opções.

### 2.2.3 Modelo misto




O modelo misto combina os dois tipos de modelos analisados anteriormente. A maior parte dos países onde ocorreu a reestruturação do setor elétrico usa este tipo de modelo.

No modelo misto, a utilização da bolsa corresponde a um mecanismo voluntário, na medida em que os consumidores podem transacionar energia diretamente com os produtores ou podem optar negociar na bolsa, aceitando o preço de mercado.

Neste modelo, a maioria das transações são realizadas por contratos bilaterais. No entanto, o preço da energia é obtido no mercado em bolsa, que constitui uma referência importante para a negociação de contratos bilaterais.

O simulador utilizado para as simulações, o ITEM-Game, tem implementado um modelo semelhante ao modelo em bolsa, onde os jogadores (agentes comerciais) submetem as suas ofertas de venda. Portanto, dos modelos apresentados anteriormente, aquele que é explorado nesta dissertação é o modelo em bolsa, veja-se a Tabela 2.2.3.1.

Tabela 2.2.3.1 – Modelo utilizado no simulador ITEM-Game

Modelo	Bolsa	Contratos bilaterais	Misto
ITEM-Game			

## 2.3 Teoria dos jogos

A teoria dos jogos é o estudo das formas em que as interações estratégicas entre os agentes económicos produzem resultados em relação às preferências (ou utilidades) desses agentes. Portanto, a teoria dos jogos assume a racionalidade de que cada jogador, dadas duas alternativas, irá selecionar a que lhe dá um melhor retorno. Uma das implicações da racionalidade dos jogadores é que, o jogador irá sempre escolher a melhor resposta às estratégias dos outros jogadores, sendo que a melhor resposta é uma estratégia ótima.

Os jogos estudados pela teoria são objetos matemáticos bem definidos, sendo que um jogo consiste nos seguintes aspetos:

- **Jogadores:** São os agentes que tomam decisões ao longo do jogo, selecionando as suas ações;
- **Estratégias:** Conjunto de ações possíveis que cada jogador pode tomar;
- **Pagamento ou *Pay-off*:** Resultado de cada jogador em função da sua estratégia e da estratégia dos outros jogadores;
- **Equilíbrio de Nash:** Resultado(s) do jogo em que nenhum jogador tem incentivo em alterar unilateralmente a sua estratégia.

Se por um lado, determinar o equilíbrio de Nash pode ser uma tarefa que exige demasiado esforço computacional, por outro lado, é irrealista considerar que os agentes têm conhecimento completo do ambiente de negociação, que lhes permita chegar a estratégias ótimas. O mundo real está cheio de incertezas: nem existe um conhecimento perfeito da procura de um bem ou serviço; nem é possível conhecer com exatidão o comportamento, e retorno associado, dos competidores. Assim, muitas vezes, as estratégias de mercado são baseadas em heurísticas, constituídas por ações, regras de decisão pré-definidas e/ou aprendidas e adaptáveis ao longo do tempo e às condições de mercado, que são função da informação a que o agente tem acesso [58].

A teoria dos jogos estuda decisões que são tomadas num ambiente onde vários jogadores interagem. Ou seja, a teoria dos jogos estuda as escolhas de comportamentos ótimos quando o custo e benefício de cada opção não são fixos, mas dependem, sobretudo, da escolha dos outros indivíduos.

### 2.3.1 Tipo de Jogos: simultâneo e sequencial

A diferença entre os jogos de perfeita e imperfeita informação está relacionada com a forma de como se representa a ordem do jogo. Pode-se então distinguir em termos da informação dois tipos de jogos: simultâneos e sequenciais. Jogos simultâneos (ou estáticos) são jogos onde ambos os jogadores se movem simultaneamente, ou caso não se movam simultaneamente desconhecem à-priori as decisões dos seus adversários. Jogos sequenciais (ou dinâmicos) são jogos onde o próximo jogador tem conhecimento da jogada do seu antecessor.

Nesta dissertação é utilizado o conceito dos jogos simultâneos em que, não existindo a informação sobre a decisão de cada jogador, se pretende construir uma matriz de *pay-off* com as informações da última ronda de cada simulação.

### 2.3.2 Equilíbrio de Nash

Um equilíbrio de Nash é um conjunto de estratégias tais que nenhum jogador, tendo em conta as ações dos restantes jogadores como certas, quer alterar as suas decisões, já que teria mais a perder com isso. Esta definição pode ser alargada às estratégias mistas, isto é, as estratégias que incorporam uma componente probabilística/aleatória na determinação da ação. O equilíbrio de Nash apresentado dessa forma tem implícito o conceito de sub-ótimo: isto é, para uma determinada estratégia de um adversário determina-se qual a estratégia que maximiza os resultados do jogador. Não há uma visão global do jogo por parte dos jogadores. Assim, o equilíbrio de Nash parte do princípio que as ações de um jogador não vão influenciar as ações do adversário, dando à partida o mesmo peso a todas as estratégias do adversário [59].

As respostas de um jogador racional podem ser:

- Estratégia de melhor resposta de um jogador racional: dadas as estratégias que um jogador acredita que os demais jogadores irão escolher, a melhor resposta desse jogador é dada pela estratégia que maximiza o seu *pay-off*;
- Equilíbrio de Nash: é a situação do jogo em que cada um dos jogadores adota a sua respetiva estratégia de melhor resposta.

Nos casos de estudo nesta dissertação é feita uma abordagem com a teoria dos jogos ao qual se pretende encontrar pontos de equilíbrio em relação a um conjunto de quotas alvo de mercado e a um conjunto de estratégias de investimento.

## **2.4 Síntese sobre estado da arte**

Neste capítulo foi apresentada uma descrição da evolução do processo de reestruturação mundial para o setor elétrico. Foram apresentadas as principais motivações que levaram ao desenvolvimento do processo de reestruturação das quais se destacam a abertura do setor elétrico à iniciativa privada, o aumento da competitividade entre os diferentes agentes que atuam no setor, o aumento da eficiência económica na exploração do setor e a transferência dessa melhoria através de benefícios para os consumidores.

Foram também apresentados os principais modelos a adotar para a estrutura do setor elétrico, assim como os modelos para o mercado da energia elétrica. Foi feita uma descrição do modelo em bolsa, modelo com contratos bilaterais e modelo misto. Atualmente o modelo mais adotado para o funcionamento do mercado é o modelo misto, porque proporciona uma maior independência, transparência e flexibilidade no funcionamento das diferentes atividades do setor elétrico.

Finamente, foi apresentada a teoria dos jogos que será a base das simulações efetuadas onde se pretende encontrar um ou vários equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo e de estratégias de investimento. Com o(s) equilíbrio(s) de Nash pretende-se obter a melhor resposta do jogador em relação às estratégias escolhidas pelos outros jogadores.

No próximo capítulo é apresentado de uma forma detalhada o simulador utilizado, ITEM-Game, bem como as estratégias de investimento utilizadas na tomada de decisão sobre as tecnologias a investir.



## Capítulo 3

---

### **Modelo das estratégias de investimento em ativos de produção de energia elétrica**

*Neste capítulo é descrita a metodologia das estratégias de investimento e comercialização utilizadas. Começa-se por apresentar a ferramenta utilizada para efetuar as simulações, o ITEM-Game, enunciando-se a sua interface gráfica, e de seguida apresentam-se os tipos de modelos utilizados para as estratégias e as suas características.*



## 3.1 Simulador ITEM-Game

### 3.1.1 Descrição

A plataforma ITEM-Game (*Investment and Trading in Electricity Markets Game*) é um simulador de mercados de energia elétrica onde vários participantes (jogadores) podem interagir. Neste simulador cada jogador representa uma empresa de geração de energia que pode investir em diferentes tecnologias de geração, negociar a sua capacidade numa bolsa marginal e analisar os resultados de mercado. O consumo elétrico aumenta a uma dada percentagem ao longo do tempo. Os preços dos combustíveis (urânio, carvão e gás) e das emissões de CO<sub>2</sub> são endógenos, mudando de acordo com o consumo de combustível e emissões de CO<sub>2</sub> em cada período. Cada jogo é composto por uma sequência configurável de rondas (períodos) onde cada ronda representa um período de tempo de um ano (8766 horas). No fim, ganha o jogador com o maior lucro [7].

Na Fig. 3.1.1.1 é apresentada a *interface* gráfica de um dos separadores do simulador ITEM-Game, nomeadamente o separador das decisões de investimento.

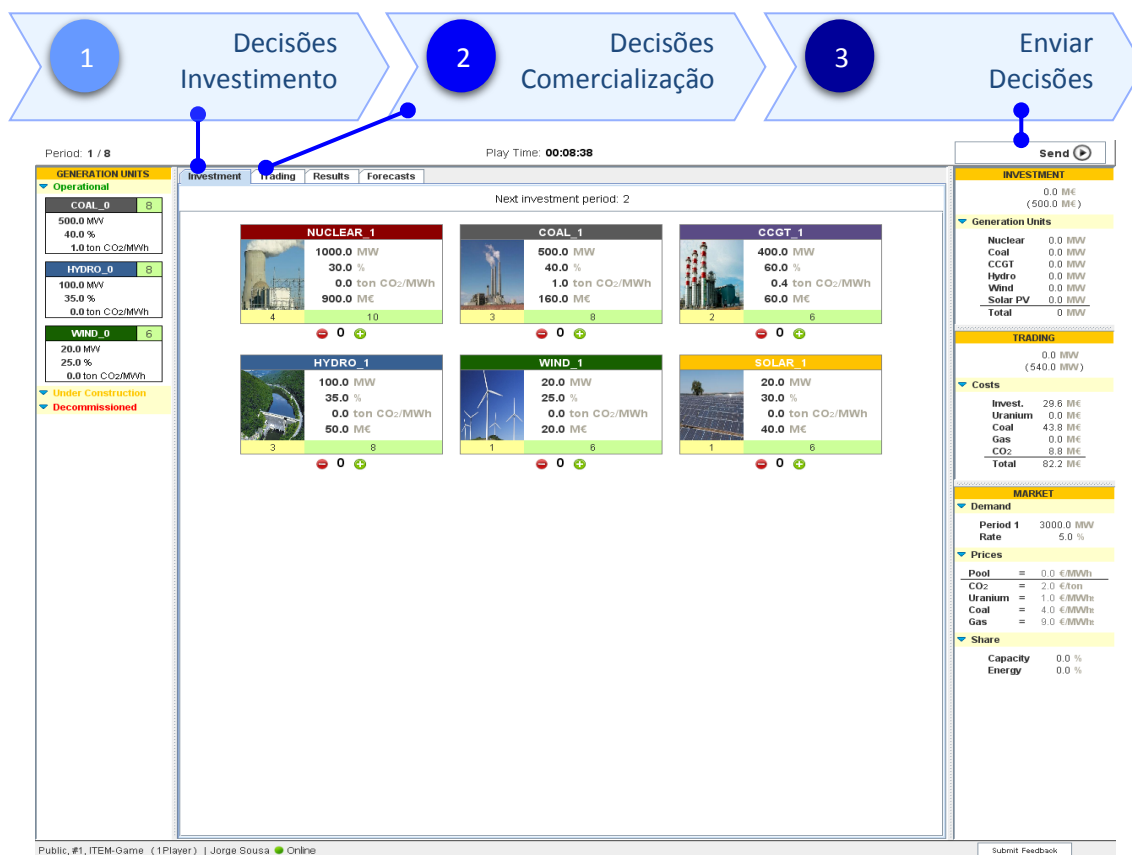


Fig. 3.1.1.1 – Interface gráfica do Simulador ITEM-Game para as decisões de investimento.

### 3.1.2 Decisões de investimento e comercialização

No ITEM-Game existem diferentes tecnologias de geração disponíveis para se investir, mais concretamente: Nuclear, Carvão, CCGT, Hídrica, Eólica e Solar. Para investir nestas tecnologias é necessário orçamento. Para cada tecnologia é fornecida a informação sobre capacidade, eficiência (para centrais térmicas) ou fator de carga (para centrais renováveis), emissões específicas de CO<sub>2</sub>, valor de investimento e períodos de construção e operação. Na Tabela 3.1.2.1 são apresentados estas características para as possíveis escolhas de investimento.

Tabela 3.1.2.1 – Características das diferentes tecnologias de geração disponíveis para investimento no ITEM-Game

Tecnologia	Nuclear	Carvão	CCGT	Hídrica	Eólica	Solar
Capacidade (MW)	1000	500	400	100	20	20
Eficiência (%)	30	40	60	-	-	-
Fator de carga (%)	-	-	-	35	25	30
Emissões de CO <sub>2</sub> (ton CO <sub>2</sub> /MWh)	0	1	0,4	0	0	0
Investimento (M€)	900	160	60	50	20	40
Períodos de construção	4	3	2	3	1	1
Períodos de operação	10	8	6	8	6	6

Em relação às decisões de comercialização, as empresas fazem ofertas para uma bolsa do mercado de energia elétrica tendo em conta a sua capacidade disponível e considerando os diferentes custos associados às tecnologias de geração. As ofertas de par quantidade/preço são licitadas numa bolsa marginal de energia elétrica e estas ofertas são despachadas até o consumo ser satisfeito. A curva de procura é inelástica e tem uma taxa de crescimento de 5% em cada período. O modelo utilizado pelo simulador é semelhante ao modelo em bolsa ou em *pool*, e na Fig. 3.1.2.1 é visualizado um exemplo da agregação das curvas de oferta e de procura, onde o preço de fecho é marcado pelo preço da última tecnologia a casar.

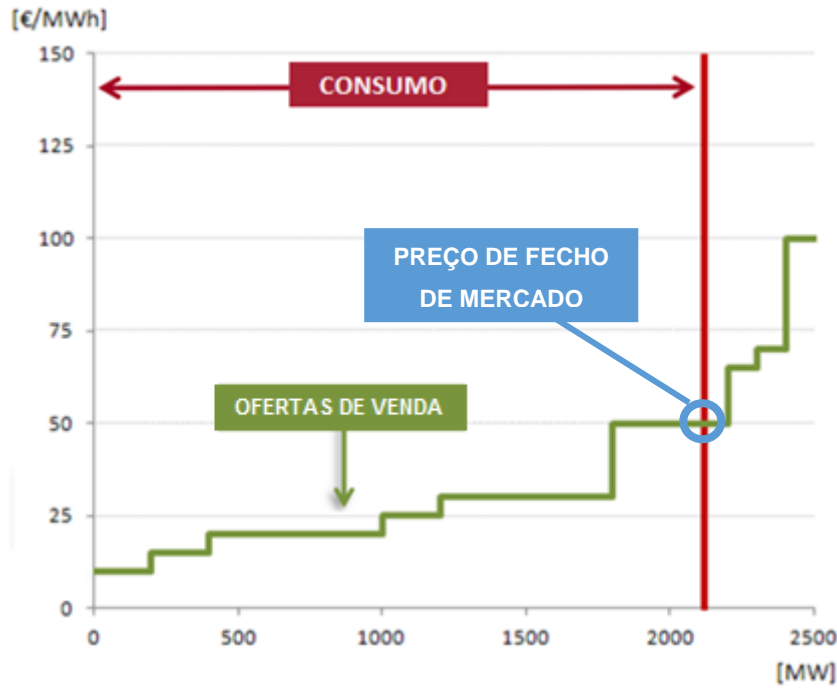


Fig. 3.1.2.1 - Exemplo da agregação das curvas de oferta e de procura no ITEM-Game.

### 3.1.3 Modelos e resultados do simulador

No início de cada jogo, todos os jogadores têm um orçamento inicial de 200M€. O orçamento inicial diminui sempre que os investimentos não estão cobertos pelos lucros atuais. Se o lucro num dado período é negativo, o orçamento é nulo. Para efeitos de simulação foi considerado que o valor de orçamento é irrestrito, ou seja, não é uma restrição nas decisões de investimento.

Os preços dos combustíveis (urânio, carvão e gás) e das emissões de CO<sub>2</sub> no período atual dependem do volume de combustível que é consumido no período anterior. Quando não há consumo de combustíveis os preços são iguais aos valores iniciais definidos para os preços dos combustíveis e das emissões de CO<sub>2</sub>. As equações (3.1.1) e (3.1.2) mostram como são calculados o preço de combustível ( $\pi^{\text{Comb}}$ ) e o preço de emissões de CO<sub>2</sub> ( $\pi^{\text{CO}_2}$ ), respetivamente.

$$\pi_{t+1}^{\text{Comb}} = \pi_0^{\text{Comb}} + \frac{\alpha^{\text{Comb}}}{N \cdot 1,05^{(t-1)}} \cdot V_t^{\text{Comb}} \quad (3.1.1)$$

$$\pi_{t+1}^{CO_2} = \pi_0^{CO_2} + \frac{\alpha^{CO_2}}{N \cdot 1,05^{(t-1)}} \cdot V_t^{CO_2} \quad (3.1.2)$$

Em que:

$N$  – Número de jogadores;

$t$  – Período corrente;

$\pi_0^{Comb}$  – Preço inicial de combustível, em €/MWh;

$\alpha^{Comb}$  – Fator multiplicativo associado aos combustíveis ( $\alpha^{Carvão} = 0,0013$ ,  $\alpha^{Gás} = 0,0039$  e  $\alpha^{Urânio} = 0,0002$ );

$V_t^{Comb}$  – Volume de combustível consumido no período  $t$ , em GWh;

$\pi_0^{CO_2}$  – Preço inicial das emissões de  $CO_2$ , em €/ton;

$\alpha^{CO_2}$  – Fator multiplicativo associado às emissões de  $CO_2$  ( $\alpha^{CO_2} = 0,0020$ );

$V_t^{CO_2}$  – Volume de emissões de  $CO_2$  no período  $t$ , em kton.

Os custos das tecnologias de geração são definidos como a soma do custo fixo e variável. O custo fixo é dado pelo custo de investimento, isto é, o valor de investimento de uma tecnologia é dividido de igual maneira pelos seus períodos de construção. Na Equação (3.1.3) é apresentado o custo de investimento de cada tecnologia no período  $t$  ( $C_{i,t}^{inv}$ ).

$$C_{i,t}^{inv} = \frac{I_i}{OP_i \cdot P_i \cdot 8766} \quad (3.1.3)$$

Onde:

$I_i$  – Valor de investimento de uma única unidade da tecnologia  $i$ , em M€;

$OP_i$  – Períodos de operação da tecnologia  $i$ ;

$P_i$  – Capacidade nominal da tecnologia  $i$ , em MW.

O custo variável de cada tecnologia é dado pela soma do custo de emissões de CO<sub>2</sub> e do custo do combustível. As equações (3.1.4) e (3.1.5) apresentam os custos de combustível ( $C^{Comb}$ ) e emissões de CO<sub>2</sub> ( $C^{CO2}$ ), respetivamente, da tecnologia  $i$  no período  $t$ .

$$C_{i,t}^{Comb} = \frac{\pi_t^{Comb}}{\eta_i} \quad (3.1.4)$$

$$C_{i,t}^{CO2} = \pi_t^{CO2} \cdot SE_i \quad (3.1.5)$$

Onde:

$\pi_t^{Comb}$  – Preço do combustível (urânio, carvão ou gás) no período  $t$ , em €/MWh;

$\eta_i$  – Rendimento da tecnologia  $i$ ;

$\pi_t^{CO2}$  – Preço das emissões de CO<sub>2</sub> no período  $t$ , em €/ton;

$SE_i$  – Emissões específicas de CO<sub>2</sub> da tecnologia  $i$ , em ton/MWh.

Os resultados são apresentados no fim de cada ronda, sendo o lucro ( $L_t$ ) calculado a partir da diferença entre as receitas ( $R_t$ ) e os custos ( $C_t$ ) da empresa no período  $t$ , definidos pelas equações (3.1.6), (3.1.7) e (3.1.8).

$$R_t = \pi_t^{pfm} \cdot 8766 \cdot \sum_{i=1}^n P_{i,t}^{desp} \quad (3.1.6)$$

$$C_t = 8766 \cdot \left( \sum_{i=1}^n P_{i,t} \cdot C_{i,t}^{inv} + \sum_{i=1}^n P_{i,t}^{desp} \cdot (C_{i,t}^{Comb} + C_{i,t}^{CO2}) \right) \quad (3.1.7)$$

$$L_t = R_t - C_t \quad (3.1.8)$$

Em que:

$n$  – Número de tecnologias operacionais no período  $t$ ;

$\pi_t^{pfm}$  – Preço de fecho de mercado no período  $t$ , em €/MWh;

$P_{i,t}^{desp}$  – Potência despachada da tecnologia  $i$  no período  $t$ , em MW;

$P_{i,t}$  – Capacidade operacional da tecnologia  $i$  no período  $t$  em MW.

### 3.1.4 Interface entre ITEM-Game e *Python*

Para realizar as estratégias é necessário ler os resultados de cada ronda. No fim de cada ronda, o simulador ITEM-Game escreve um ficheiro de saída, com formato em XML, com os resultados relevantes da referida ronda. Os resultados do ITEM-Game são interpretados por um modelo de conhecimento de mercado que implementa as estratégias de investimento e comercialização que foram criadas na linguagem de programação *Python*. Como resultado do modelo, é criado um ficheiro de entrada com as decisões estratégicas de investimento e de comercialização que são implementadas na ronda seguinte. Este processo repete-se no final de cada ronda. A Fig. 3.1.4.1 apresenta todo este processo de simulação e no Anexo A é possível visualizar um tutorial de simulação passo a passo.

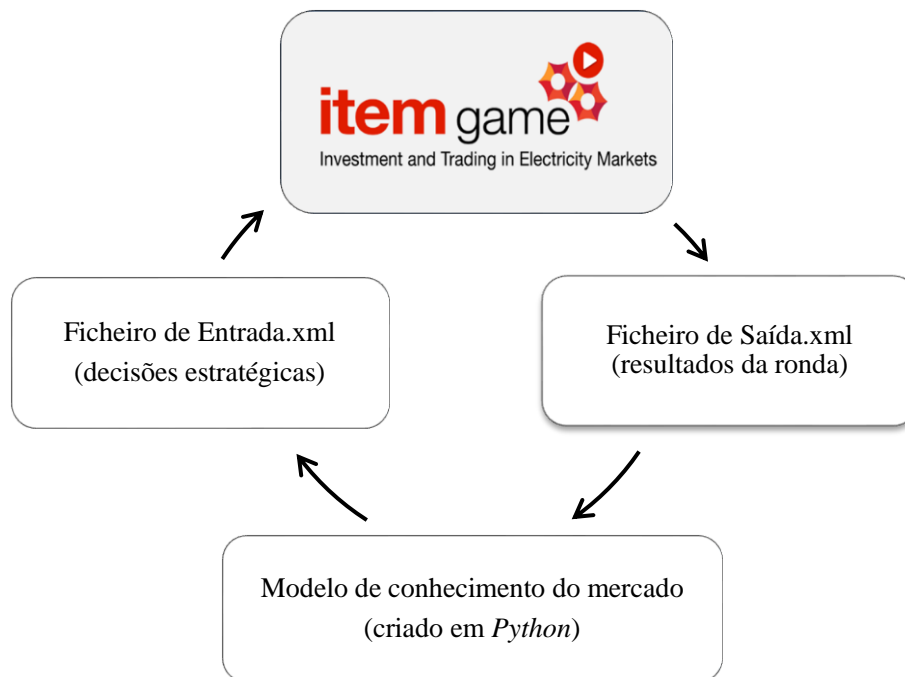


Fig. 3.1.4.1 - Processo de interação entre o ITEM-Game e as estratégias implementadas.

A informação necessária, fornecida pelo ficheiro de saída, para efetuar as decisões estratégicas inclui, entre outros, preços (CO<sub>2</sub>, urânio, carvão e gás), informação das tecnologias de geração, capacidade operacional da empresa, número de jogadores e consumo.



### 3.2 Estratégias de investimento baseadas na quota de mercado

A metodologia usada nas estratégias de investimento apresentadas nos seguintes subcapítulos têm por base preencher uma quota de mercado alvo, isto é, a capacidade instalada da empresa é uma percentagem do consumo num dado período. Esta estratégia avalia o mercado num horizonte temporal até quatro períodos, e a empresa investe tendo em conta uma potência alvo para o período  $t+4$ . Foi considerado o período  $t+4$  pois teve-se em conta o tempo de construção das tecnologias (central nuclear tem o maior tempo de construção, 4 períodos), e assim é dada a mesma hipótese a todas as tecnologias na decisão de investimento.

Esta potência alvo pode ser preenchida pelas unidades das tecnologias disponíveis e podem existir várias opções, portanto foram consideradas três estratégias na escolha das tecnologias, nomeadamente tendo em conta os custos específicos de investimento e os custos médios.

A potência alvo ( $P_t^A$ ) é calculada segundo a equação (3.2.1).

$$P_t^A = A \cdot D_{t+4} - P_{t+4}^{Op} \quad (3.2.1)$$

Sujeito a:

$$P_{t+4}^{Op} = \sum_{i=1}^n P_{i,t+4} \quad (3.2.2)$$

$$A \cdot D_{t+4} > P_{t+4}^{Op} \quad (3.2.3)$$

Em que:

$A$  – Valor de quota alvo pretendido pela empresa de geração.  $A \in [0;1]$ ;

$D_{t+4}$  – Consumo de energia no período  $t+4$ , em MW;

$P_{t+4}^{Op}$  – Capacidade total operacional da empresa no período  $t+4$ , em MW;

$n$  – Número de tecnologias operacionais no período  $t+4$ .

Na situação de não existir possibilidade de avaliar o mercado até quatro períodos, a potência alvo será calculada tendo em conta o último período de jogo. Por exemplo, se a simulação está a decorrer no período 7 e se acaba no período 10, a equação (3.2.1) calcula a potência alvo para o período 10 ( $t+3$ ) e não para o período 11 ( $t+4$ ).

No cálculo da potência total operacional (restrição (3.2.2)) é somada a capacidade total instalada ou a ser instalada pela empresa, ou seja, se uma central está em construção, a sua potência contabiliza-se quando esta entra em atividade, e o mesmo se passa para o tempo de operação, se a central sair de operação antes do período  $t+4$ , será descontada a sua potência no referido período.

Como referido anteriormente, a potência alvo é preenchida pelas unidades das tecnologias disponíveis e podem existir várias opções, portanto foram consideradas as estratégias referidas nos capítulos 3.2.1, 3.2.2 e 3.2.3.

A formulação da decisão de investimento é dada por (3.2.4), (3.2.5) e (3.2.6). Na equação (3.2.4) é encontrado o mínimo de dois valores, o primeiro valor é o quociente entre o diferencial da potência alvo e a capacidade da tecnologia  $i$ , o segundo valor é o quociente entre o orçamento no período  $t$  e o investimento da tecnologia  $i$ .

$$n_{i,t} = \text{mínimo} \left( n_{i,t}^P = \frac{\Delta P}{P_i}; n_{i,t}^I = \frac{O_t}{I_i} \right) \quad (3.2.4)$$

Sujeito a:

$$\Delta P = P_t^A - \sum_{i=1}^6 n_{i,t} \cdot P_i \quad (3.2.5)$$

$$P_t^A \cdot 1.1 \geq \sum_{i=1}^6 n_{i,t} \cdot P_i \quad (3.2.6)$$

Em que:

$n_{i,t}$  – Número de tecnologias do tipo  $i$  no período  $t$ ;

$n_{i,t}^P$  – Número de tecnologias referente à capacidade do tipo  $i$  no período  $t$ ;

$P_i$  – Capacidade da tecnologia  $i$ , em MW;

$\Delta P$  – Diferença entre a potência alvo no período  $t+4$  e entre o somatório da potência investida da tecnologia  $i$  no período  $t$ , em MW;

$n_{i,t}^I$  – Número de tecnologias referente ao investimento do tipo  $i$  no período  $t$ ;

$O_t$  – Orçamento no período  $t$ , em M€;

$I_i$  – Valor de investimento de cada unidade da tecnologia  $i$ , em M€.

Para verificar se a potência investida se aproxima da potência alvo é considerada a restrição (3.2.5) e à medida que o algoritmo avança  $\Delta P$  é aproximadamente nulo.

Para garantir que não é instalada uma potência superior à potência alvo a restrição (3.2.6) é considerada. A potência a instalar está limitada até 10% a mais em relação à potência alvo. Foi considerado 10% porque em alguns casos a decisão não recai sobre uma determinada tecnologia por poucos MW. Mesmo que a potência alvo seja igual à capacidade da tecnologia o algoritmo tenta instalar mais 10% de capacidade.

Tendo os valores  $n_{i,t}$  das tecnologias escolhidas, o resultado desta estratégia será dado pelo vetor (3.2.7). Na Fig. 3.1.4.1 é apresentado o fluxograma do processo deste algoritmo.

$$DI_{i,t} = \{n_N \quad n_C \quad n_G \quad n_H \quad n_E \quad n_S\}_t \quad (3.2.7)$$

Onde:

$DI_{i,t}$  – Decisão de investimento no período  $t$ ;

$n_N$  – Número de tecnologias do tipo Nuclear;

$n_C$  – Número de tecnologias do tipo Carvão;

$n_G$  – Número de tecnologias do tipo CCGT;

$n_H$  – Número de tecnologias do tipo Hídrica;

$n_E$  – Número de tecnologias do tipo Eólica;

$n_S$  – Número de tecnologias do tipo Solar;

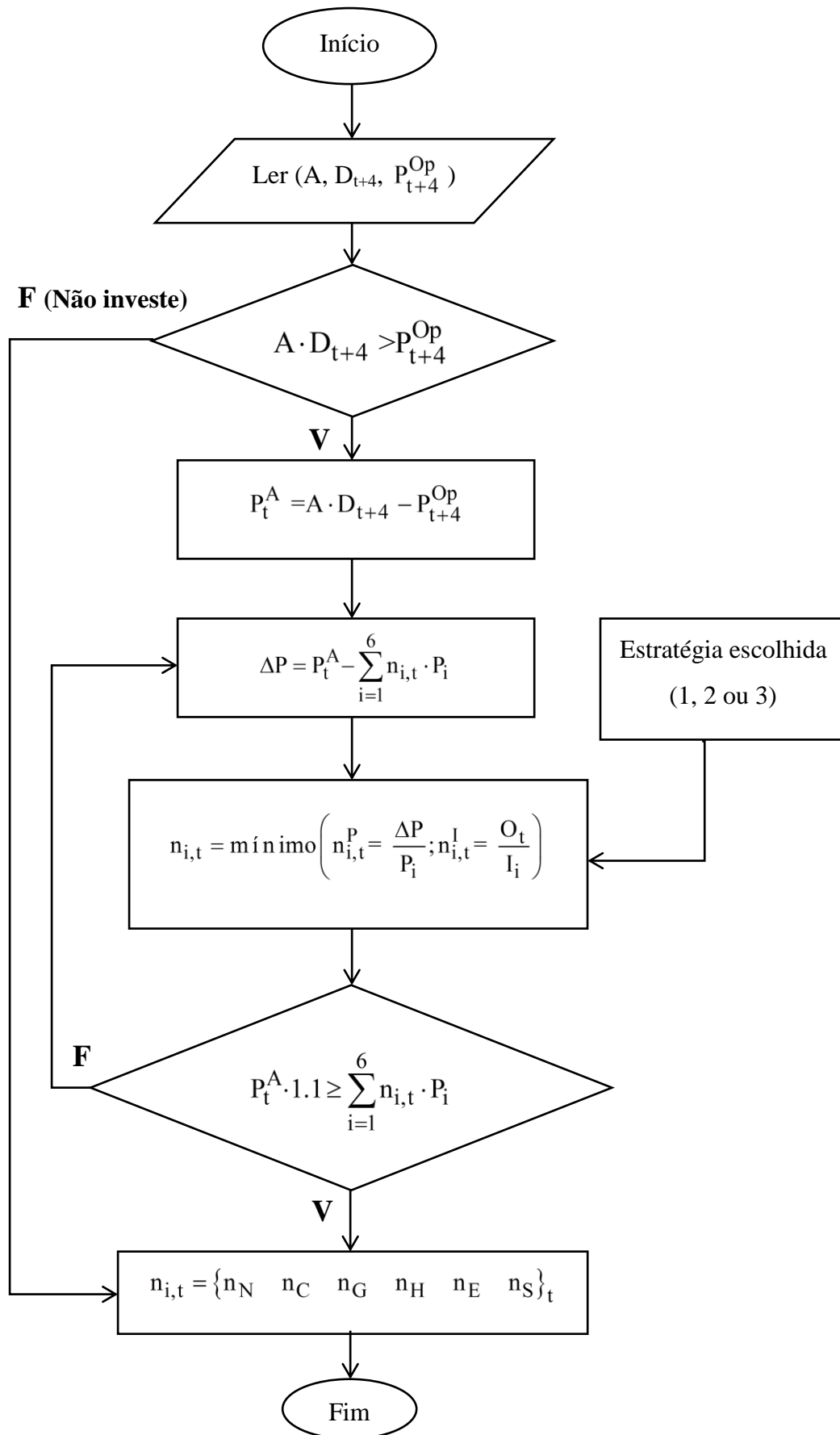


Fig. 3.1.4.1 – Fluxograma do algoritmo.

### 3.2.1 Estratégia 1 – custo específico de investimento

Esta estratégia tem em consideração o custo específico de investimento de cada tecnologia. Este custo fornece a informação de qual a tecnologia que fornece mais capacidade de potência ao menor custo de investimento. Este custo é calculado de acordo com a equação (3.2.8) onde  $I_i$  é o valor de investimento da tecnologia  $i$  e  $P_i$  é a capacidade de potência da tecnologia  $i$ . Na Tabela 3.2.1.1 está representada a ordem de mérito em relação ao custo específico de investimento de cada tecnologia.

$$C_i^W = \frac{I_i}{P_i} \quad (3.2.8)$$

Onde:

$C_i^W$  – Custo específico de investimento da tecnologia  $i$ , em €/W;

$I_i$  – Investimento da tecnologia  $i$ , em M€;

$P_i$  – Capacidade da tecnologia  $i$ , em MW.

Tabela 3.2.1.1 – Ordem de mérito: custo específico de investimento de cada tecnologia

Tecnologia	$C^W$ (€/W)
CCGT	0,15
Carvão	0,32
Nuclear	0,9
Hídrica	1,4
Eólica	4
Solar	7

Da Tabela 3.2.1.1 verifica-se que a tecnologia de geração com menor custo é CCGT, seguida de Carvão, Nuclear, Hídrica, Eólica e Solar. Portanto a potência alvo será preenchida de acordo com esta ordem de mérito, sendo que nesta estratégia a decisão de investimento recai sobre centrais de CCGT.

### 3.2.2 Estratégia 2 – custo médio da tecnologia no período corrente

Nesta estratégia é considerado o custo médio da tecnologia no período corrente. Este custo é dado pela soma dos custos fixos e variáveis. Os custos fixos são constantes ao longo dos períodos de jogo e são determinados a partir da equação (3.1.3). Os custos variáveis são determinados de acordo com os custos de combustível e os custos de emissões de CO<sub>2</sub> num dado período e são calculados a partir das equações (3.1.4) e (3.1.5). O custo médio de cada tecnologia ( $C_{i,t}^M$ ) é calculado de acordo com a equação (3.2.9).

$$C_{i,t}^M = C_{i,t}^{Inv} + C_{i,t}^{Comb} + C_{i,t}^{CO2} \quad (3.2.9)$$

Em que:

$C_{i,t}^{Inv}$  – Custo de investimento da tecnologia i no período t, em €/MWh;

$C_{i,t}^{Comb}$  – Custo de combustível da tecnologia i no período t, em €/MWh;

$C_{i,t}^{CO2}$  – Custo de emissões de CO<sub>2</sub> da tecnologia i no período t, em €/MWh.

Depois de calcular os custos médios de cada tecnologia no período corrente, estes são ordenados do menor custo para o maior, portanto é realizada uma ordem de mérito, da mesma maneira que foi feito na estratégia do custo específico de investimento.

### 3.2.3 Estratégia 3 – previsão dos custos médios

Esta estratégia é semelhante à estratégia 2, só que em vez de considerar o custo médio da tecnologia no período corrente, é considerado o custo médio da tecnologia no período em que esta entra em operação, ou seja, é realizada uma previsão dos preços de urânio, carvão, gás e emissões de CO<sub>2</sub>.

O preço dos combustíveis (urânio, carvão e gás) é dado pela equação (3.1.1) em que a única incógnita é valor do volume de combustível consumido. Este valor de volume é dimensionado para a pior situação, ou seja, por exemplo, no período em que entra em operação a central nuclear, é considerada que toda a potência despachada é de origem nuclear. O mesmo se constata no período em que entram em operação as centrais de carvão e gás. Portanto os volumes de combustível de urânio, carvão e gás são calculados nas equações (3.2.10), (3.2.11) e (3.2.12), respetivamente.

$$V_{t+4}^{\text{Urânio}} = \frac{D_{t+4} \cdot 8766}{\eta_{\text{Nuclear}}} \quad (3.2.10)$$

$$V_{t+3}^{\text{Carvão}} = \frac{D_{t+3} \cdot 8766}{\eta_{\text{Carvão}}} \quad (3.2.11)$$

$$V_{t+2}^{\text{Gás}} = \frac{D_{t+2} \cdot 8766}{\eta_{\text{CCGT}}} \quad (3.2.12)$$

Onde:

$V_{t+4}^{\text{Urânio}}$  – Volume de urânio consumido no período t+4, em GWht;

$D_{t+4}$  – Consumo de energia no período t+4, em MW;

$\eta_{\text{Nuclear}}$  – Rendimento da Central Nuclear;

$V_{t+3}^{\text{Carvão}}$  – Volume de carvão consumido no período t+3, em GWht;

$D_{t+3}$  – Consumo de energia no período t+3, em MW;

$\eta_{\text{Carvão}}$  – Rendimento da Central de Carvão;

$V_{t+2}^{\text{Gás}}$  – Volume de gás consumido no período t+2, em GWht;

$D_{t+2}$  – Consumo de energia no período t+2, em MW;

$\eta_{\text{CCGT}}$  – Rendimento da Central CCGT.

Em relação ao preço de CO<sub>2</sub> também foi considerada a pior situação. Na equação (3.1.2) o volume das emissões de CO<sub>2</sub> é função da potência despachada devido às centrais de carvão e gás, portanto o volume é dimensionado para a situação em que o consumo é maior ( $D_{t+3} > D_{t+2}$ ), veja-se equação (3.2.13).

$$V_t^{\text{CO}_2} = D_{t+3} \cdot 8766 \cdot SE_{\text{Carvão}} \quad (3.2.13)$$

Em que:

$V_t^{\text{CO}_2}$  – Volume de emissões de CO<sub>2</sub> no período t, em kton;

$D_{t+3}$  – Consumo de energia no período t+3, em MW;

$SE_{\text{Carvão}}$  – Emissões específicas de CO<sub>2</sub> da central de Carvão, em ton/MWh.

Sabendo os volumes de combustíveis e de emissões de CO<sub>2</sub>, calculam-se os novos custos médios de cada tecnologia, de acordo com a equação (3.2.9), e é realizada uma nova ordem de mérito para a decisão de investimento.



### 3.3 Estratégias de comercialização

Esta dissertação é focada nas estratégias de investimento mas no simulador ITEM-Game, para uma estratégia completa, também é necessário incluir as decisões de comercialização de energia elétrica, por isso, é necessário implementar uma estratégia de comercialização.

Para a estratégia de comercialização é necessário definir qual o par quantidade/preço das tecnologias existentes da empresa, e a metodologia escolhida é oferecer a capacidade total de cada tecnologia ao preço igual aos seus custos médios correspondentes. Portanto as quantidades e preços de cada tecnologia são definidos pelas equações (3.3.1) e (3.3.2).

$$Q_{i,t} = P_{i,t} \quad (3.3.1)$$

$$\pi_{i,t} = C_{i,t}^M = C_{i,t}^{Inv} + C_{i,t}^{Comb} + C_{i,t}^{CO2} \quad (3.3.2)$$

Em que:

$Q_{i,t}$  – Quantidade de potência oferecida da tecnologia  $i$  no período  $t$ , em MW;

$P_{i,t}$  – Capacidade da tecnologia  $i$  no período  $t$ , em MW;

$\pi_{i,t}$  – Preço oferecido da tecnologia  $i$  no período  $t$ , em €/MWh;

O resultado desta estratégia é dado por (3.3.3) em que  $DC_{i,b,t}$  é a decisão de comercialização no período  $t$ .

$$DC_{i,t} = \{Q_i \quad \pi_i\}_t \quad (3.3.3)$$

Visto que o foco desta dissertação são as estratégias de investimento, a potência operacional de cada jogador, em que este pode ter mais que uma tecnologia, é oferecida ao valor igual aos custos médios, equação (3.2.9), de cada tecnologia respetivamente.

### 3.4 Considerações em relação às estratégias propostas

Este capítulo descreve o simulador utilizado e o modelo das estratégias realizadas no âmbito desta dissertação, em que são apresentadas as várias estratégias para a tomada de decisão de investimento.

Na primeira parte do capítulo descreve-se a plataforma de simulação ITEM-Game, este que é o simulador utilizado nas simulações realizadas nesta dissertação. Referiram-se as suas características e descreveram-se os modelos matemáticos por de trás do simulador.

Na segunda parte, é descrita a estratégia de investimento baseada numa quota de mercado alvo. Foram propostas três estratégias para a tomada de decisão desta estratégia, nomeadamente: i) custo específico de investimento; ii) custo médio da tecnologia no período atual; iii) custo médio da tecnologia no período em que a tecnologia entra em operação. A estratégia que tem em conta o custo específico de investimento baseia-se na tecnologia que fornece mais capacidade de potência ao menor custo de investimento. A segunda estratégia, custo médio da tecnologia no período atual, tem por base a realização da ordem de mérito de investimento atendendo aos preços dos combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub> no período atual, ou seja, no período em que se investe. A última estratégia, custo médio da tecnologia no período em que a tecnologia entra em operação, é semelhante à estratégia anterior, só que nesta são previstos os volumes de combustíveis consumidos e de emissões de CO<sub>2</sub> refazendo assim a ordem de mérito na tomada de decisão.

É ainda enunciada a estratégia de comercialização, visto que no simulador ITEM-Game esta é necessária para realizar uma estratégia completa (Investimento e Comercialização). Nesta estratégia é definido que o preço de oferta de cada tecnologia ao seu respetivo custo médio e também que toda a potência de cada tecnologia é oferecida num único bloco.

No capítulo seguinte, ir-se-ão mostrar as simulações efetuadas, tendo em conta as estratégias descritas no presente capítulo. Pretende-se encontrar quotas alvo de equilíbrio utilizando a teoria de jogos. Encontrada(s) a(s) quota(s) alvo de equilíbrio, as três estratégias propostas são jogados umas contra as outras sendo que também se pretende encontrar um ou mais equilíbrios de Nash.

# Capítulo 4

---

## Simulações e resultados

*Neste capítulo efetuam-se os testes ao simulador proposto para o mercado elétrico, de modo a analisar as estratégias desenvolvidas, e o comportamento do mercado elétrico que daí resulta.*

*Todas as simulações efetuadas neste capítulo foram feitas num portátil Toshiba Satellite A-300 (Pentium(R) Dual-Core CPU, processador 2.00 GHz, 4 GB de RAM) a correr sobre o sistema operativo Windows 7 Ultimate SP1. A execução das simulações demorou, em média, cerca de 28 minutos. No total foram realizadas 57 simulações.*



## 4.1 Pressupostos e variáveis em estudo

Nos próximos subcapítulos é apresentada uma abordagem à teoria de jogos, ao qual se pretende encontrar um ou mais equilíbrios de Nash para um conjunto de estratégias. Para isso é necessário estabelecer as condições iniciais e as variáveis de estudo que se pretendem avaliar de forma a encontrar equilíbrios.

Portanto, em todas as simulações realizadas os **pressupostos** foram os seguintes:

- Simulações com 4 jogadores;
- O consumo no período inicial é de 2800 MW e tem associado uma taxa de crescimento de 5% em cada período;
- Todos os jogadores começam sem unidades de geração instaladas;
- Todos os jogadores utilizam a mesma estratégia de comercialização descrita no capítulo 3.3;
- Orçamento irrestrito, ou seja, não é uma restrição na decisão de investimento;
- Os preços iniciais de combustíveis e de emissões de CO<sub>2</sub> considerados são os descritos na Tabela 3.2.3.1:

Tabela 3.2.3.1 – Preços iniciais de combustíveis e de emissões de CO<sub>2</sub>

Preços iniciais	
Urânio (€/MWht)	1
Carvão (€/MWht)	4
Gás (€/MWht)	9
CO <sub>2</sub> (€/ton)	2

Para efeitos de simulação são considerados 14 períodos e são analisados os últimos 10 períodos (do período 5 ao período 14). Como já referido, para o cálculo da potência alvo considerou-se o período t+4 devido ao tempo de construção das tecnologias. Tendo em conta o período de operação das tecnologias, considerou-se os últimos 10 períodos para análise visto que se pretende que o valor de investimento seja totalmente abatido para o pior caso, que é na situação de o jogador investir no período 1 num central nuclear, visto que esta entra em operação no período 5 e é desclassificada no período 14. Na Fig. 3.2.3.1 estão representados os períodos de simulação considerados tendo em conta o descrito anteriormente.

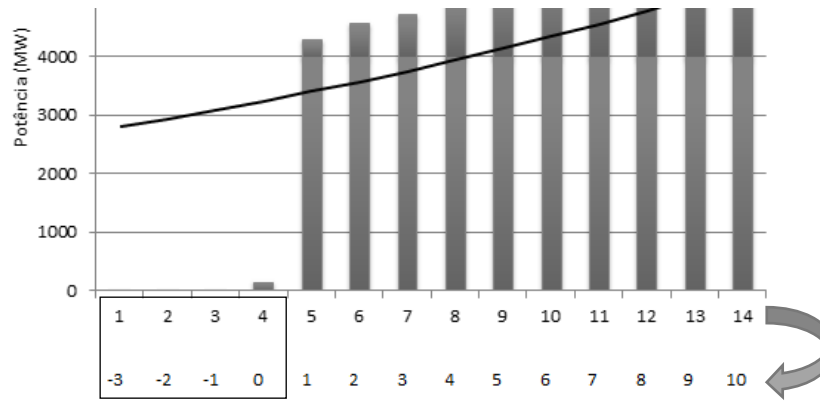


Fig. 3.2.3.1 – Períodos de simulação considerados.

Nas tabelas e figuras apresentadas nos próximos subcapítulos a nomenclatura é a seguinte:

- Jogador 2|3|4 – Resultados do Jogadores 2, que são idênticos aos resultados dos Jogadores 3 e 4;
- N – Nuclear, C – Carvão, G – CCGT, H – Hídrica, E – Eólica, S – Solar.

Utilizando a teoria de jogos, pretende-se encontrar equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo e para um conjunto de estratégias (as três estratégias propostas). As simulações dos próximos subcapítulos são realizadas de acordo com o seguinte:

- **Conjunto de quotas alvo (subcapítulo 4.3):**
  1. O objetivo é encontrar equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo;
  2. As simulações utilizam os pressupostos descritos anteriormente;
  3. Todos os jogadores utilizam a estratégia 2 como base para as simulações;
  4. A matriz de *pay-off* tem como resultado o lucro dos jogadores.
  5. A **variável em estudo** é o lucro;
- **Conjunto de estratégias propostas (subcapítulo 4.4):**
  1. O objetivo é encontrar equilíbrios de Nash para as três estratégias propostas;
  2. As simulações utilizam os pressupostos descritos anteriormente;
  3. Todos os jogadores têm como valor de quota alvo, um dos equilíbrios encontrados no subcapítulo 4.3;
  4. A matriz de *pay-off* tem como resultado o lucro dos jogadores.
  5. A **variável em estudo** é o lucro de cada jogador;

## 4.2 Simulação dos casos de estudo

De seguida é apresentada uma de várias simulações efetuadas para encontrar equilíbrios de Nash que são descritos no subcapítulo 4.3. De modo a construir a matriz de *pay-off's* com os lucros dos jogadores, foram considerados os seguintes valores de quota alvo para cada um dos jogadores:

- Jogador 1:  $A_{jog1} = [10 \ 20 \ 25 \ 30 \ 40 \ 50 \ 60 \ 70] \%$ ;
- Jogador 2|3|4:  $A_{jog2|3|4} = [10 \ 20 \ 25 \ 30 \ 40 \ 50] \%$

Na simulação apresentada a seguir é considerado que todos os jogadores têm uma quota alvo de 25% e estes utilizam a estratégia 2 – custo médio no período corrente.

Na Fig. 3.2.3.1 são apresentados os resultados da simulação em que:

- Corresponde à potência total instalada no mercado, e esta está dividida pelas tecnologias existentes no mercado. Os blocos de potência de cada tecnologia estão ordenados consoante o seu custo médio, tendo sido colocados os blocos do menor custo para o maior. Visto que a estratégia de comercialização licita as quantidades das tecnologias ao preço igual aos seus custos médios, é possível observar, tendo ainda em conta a linha do consumo, qual a tecnologia que marcou o preço de fecho de mercado e qual a quantidade de potência que não foi despachada. Nesta figura existe ainda informação, num eixo secundário, sobre o preço de fecho de mercado em cada período;
- Informação sobre a evolução dos custos médios de cada tecnologia no decorrer da simulação. É também possível verificar qual a tecnologia que marcou o preço de fecho de mercado;
- Evolução dos preços dos combustíveis (eixo ordenadas principal) e do preço das emissões de CO<sub>2</sub> (eixo ordenadas secundário);
- Valor normalizado dos volumes de combustíveis consumidos e do volume das emissões de CO<sub>2</sub> emitidas;
- Informação sobre a potência instalada por tecnologia pelo jogador 1;
- Informação sobre a potência instalada por tecnologia pelo jogador 2|3|4;
- Quota de mercado atingida por cada jogador em cada período;
- Lucro obtido por cada jogador em cada período.

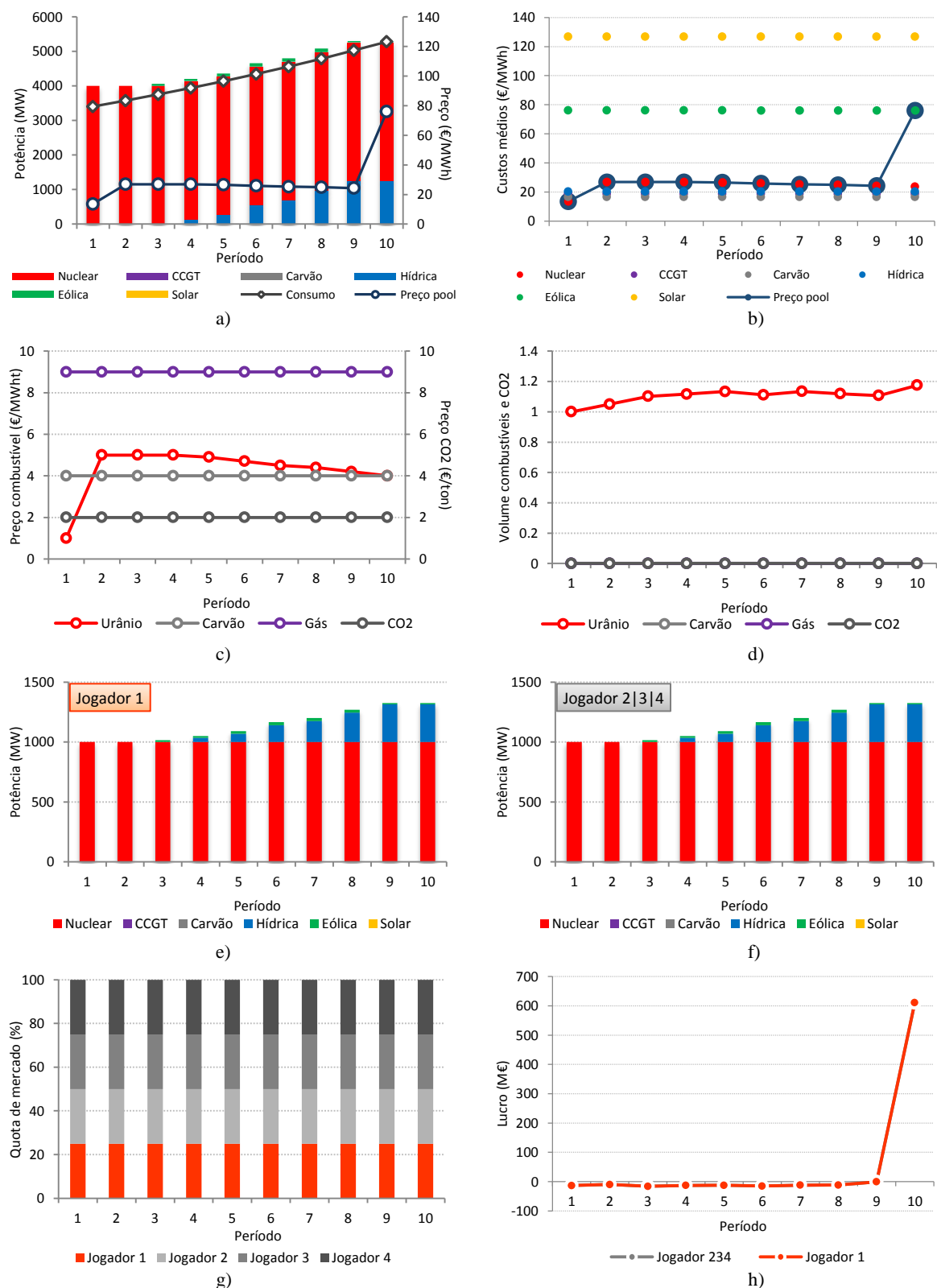


Fig. 3.2.3.1 – Resultado da simulação em que cada jogador tem uma quota alvo de 25%: a) Potência total instalada, consumo e preço de fecho de mercado; b) Custos médios das tecnologias em cada período com marcação de qual marcou o preço de fecho; c) Evolução dos preços de combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub>; d) Volumes de combustíveis consumidos e de emissões de CO<sub>2</sub>; e) Potência instalada pelo jogador 1; f) Potência instalada pelo jogador 2|3|4; g) Quota de mercado atingida por cada jogador; h) Lucro obtido por cada jogador.



Na Tabela 3.2.3.1 são apresentadas as decisões de investimento e comercialização do jogador 1 em que:

- Corresponde às decisões de investimento onde a 1ª coluna corresponde ao período de decisão, na 2ª coluna é apresentada a potência alvo, na 3ª à 8ª coluna são apresentados os custos médios das tecnologias no período corrente. A 9ª coluna corresponde à ordem de mérito, sendo assinalado quando a ordem altera. Na última coluna é dada informação sobre qual o número de tecnologias em que se investiu.
- Nesta tabela é apresentada a decisão de comercialização do jogador 1 em que para cada tecnologia operacional é licitada a sua potência ao preço igual aos seus custos médios, como já referido anteriormente.

Tabela 3.2.3.1 – Decisões do jogador 1: a) investimento; b) comercialização

a)

Período	$P_t^A$ (MW)	Custos médios (€/MWh)						Ordem de mérito	Decisão de investimento
		N	C	G	H	E	S		
-3	936	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 N
-2	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
-1	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
0	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
1	38	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 H
2	56	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 3 E
3	61	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
4	46	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 1 E
5	85	26,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H; 1 E
6	71	25,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
7	0	25,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
8	0	24,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
9	0	24,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
10	0	23,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	

b)

t	Nuclear		Carvão		CCGT		Hídrica		Eólica		Solar	
	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)
1	1000	13,6										
2	1000	26,9										
3	1000	26,9							15	76,1		
4	1000	26,9					35	20,4	15	76,1		
5	1000	26,6					70	20,4	20	76,1		
6	1000	25,9					140	20,4	25	76,1		
7	1000	25,3					175	20,4	25	76,1		
8	1000	24,9					245	20,4	25	76,1		
9	1000	24,3					315	20,4	10	76,1		
10	1000	23,6					315	20,4	10	76,1		

Na Tabela 3.2.3.2 são apresentadas as decisões de investimento e comercialização do jogador 2|3|4, portanto a descrição desta tabela é igual à anterior.

Tabela 3.2.3.2 - Decisões do jogador 2|3|4: a) investimento; b) comercialização

a)

Período	$P_t^A$ (MW)	Custos médios (€/MWh)						Ordem de mérito	Decisão de investimento
		N	C	G	H	E	S		
-3	936	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 N
-2	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
-1	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
0	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
1	38	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 H
2	56	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 3 E
3	61	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
4	46	26,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 1 E
5	85	26,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H; 1 E
6	71	25,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
7	0	25,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
8	0	24,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
9	0	24,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
10	0	23,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	

b)

t	Nuclear		Carvão		CCGT		Hídrica		Eólica		Solar	
	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)
1	1000	13,6										
2	1000	26,9										
3	1000	26,9							15	76,1		
4	1000	26,9					35	20,4	15	76,1		
5	1000	26,6					70	20,4	20	76,1		
6	1000	25,9					140	20,4	25	76,1		
7	1000	25,3					175	20,4	25	76,1		
8	1000	24,9					245	20,4	25	76,1		
9	1000	24,3					315	20,4	10	76,1		
10	1000	23,6					315	20,4	10	76,1		

Analisando-se os resultados desta simulação, destacam-se as seguintes observações:

- Como a estratégia utilizada tem em conta os custos médios no período corrente (estratégia 2), a decisão de investimento no período inicial recai sobre uma central Nuclear visto apresentar o custo médio inferior e a potência alvo ser 936 MW.

- Como se pode observar na Fig. 3.2.3.1 a), o mercado é dominado pelas centrais nucleares, sendo que entre os períodos 4 a 10 surgem centrais hídricas e entre os períodos 3 a 10 aparecem centrais eólicas. Isto deve-se ao facto de que para valores de potência alvo menores, entre 38 a 85 MW, a decisão de investimento recai sobre as centrais de tecnologia renovável.
- É ainda possível observar na Fig. 3.2.3.1 a) a tecnologia que marca o preço de fecho de mercado. Entre os períodos 1 a 9 a tecnologia que marca o preço é nuclear e no período 10 marca a tecnologia eólica, veja-se Fig. 3.2.3.1 b). Isto sucede visto que entre os períodos 3 a 9, em que existem pelo menos duas tecnologias no mercado, a potência total não é toda despachada. Já no período 10, onde a potência total instalada do mercado tem o mesmo valor do consumo (Visto que a quota alvo é 25%, no período final de simulação a potência total instalada no mercado é igual a 100%), toda a potência de mercado é despachada e a última tecnologia a casar é eólica.
- Observando-se a Fig. 3.2.3.1 h), devido ao facto de no último período o preço de fecho de mercado ser 76,1 €/MWh e os custos médios de nuclear e hídrica serem 23,4 e 20,4 €/MWh respetivamente, o lucro de cada jogador aumenta até perto de 600M€ devido à diferença entre receitas de custos. Do período 1 a 9 visto que o preço de fecho de mercado é marcado pela tecnologia nuclear, o lucro associado é praticamente nulo uma vez que as receitas são quase iguais aos custos.
- Em relação à Fig. 3.2.3.1 c), é possível observar a evolução do preço do urânio (uma vez que no mercado o único combustível é urânio, os outros preços de combustíveis mantêm-se constantes durante a simulação), em que do período 1 para 2 nota-se o único aumento de preço. Isto acontece visto que no período 1 toda a potência despachada no mercado é nuclear. Nos outros períodos visto que o volume de urânio consumido tem um aumento pouco gradual, veja-se Fig. 3.2.3.1 d), e tendo em conta a equação (3.1.1), o preço do urânio diminui ao longo da simulação.
- Na Fig. 3.2.3.1 g) é observada a quota de mercado atingida por cada jogador. Como todos os jogadores têm mesmas estratégias, a quota de mercado é distribuída igualmente.

No próximo subcapítulo é apresentada uma tabela com os lucros de cada jogador em cada uma das 48 simulações efetuadas. Como já referido pretende-se encontrar um ou mais equilíbrios de Nash.

### 4.3 Equilíbrio de Nash para conjunto de quotas de alvo

Realizadas as simulações para um conjunto de quotas alvo utilizadas por cada jogador, é analisado um par de quotas alvo de cada vez, por forma a examinar o seu impacto sobre os resultados. A Tabela 3.2.3.1 apresenta como *pay-off* o lucro de cada jogador no último período de cada simulação.

Tabela 3.2.3.1 – Resumo de resultados tendo em conta o lucro dos jogadores para diferentes quotas alvo

Jogador 1	Jogador 2 3 4					
	10 %	20 %	25 %	30 %	40 %	50 %
	(256,5; 256,5)	(233,5; 494,9)	(233,5; 631,6)	(250,1; 750,5)	(-5,2; -37,9)	(-23,3; -94,8)
	(541,6; 256,5)	(471,5; 471,5)	(471,5; 608,3)	(-22,9; -19,2)	(-57,9; -4,7)	(-59,9; -102,2)
	(678,4; 256,5)	(608,3; 471,5)	(610,7; 610,7)	(-21,5; -30,4)	(-47,9; -11)	(-55,8; -114,9)
	(798,1; 256,5)	(728; 471,5)	(-10,8; -5,6)	(-58,3; -58,3)	(-55; -16,5)	(-138,6; -173)
	(1156,1; 256,5)	(984,6; 477,3)	(10,3; -17)	(7,6; -30,8)	(-28,6; -28,6)	(5,4; -101,8)
	(1310; 256,5)	(-8,6; -20,4)	(-51; -23,8)	(-113,2; -103,4)	(-111,6; 0,5)	(-190; -190)
	(1629; 256,5)	(-11,1; -22,9)	(-58,5; -31,2)	(-100,2; -89,5)	(-61,6; -13,5)	(-208,7; -190,4)
	(1817,1; 250,6)	(23,1; -43)	(-44,5; -49)	(15,9; -43,7)	(-41,7; -21,8)	(-12; -126,6)

Na Tabela 3.2.3.1 os resultados assinalados no lado esquerdo da linha verde dizem respeito à situação em que o somatório das quotas alvo de cada jogador é igual ou inferior a 100%. É importante referir que é necessário multiplicar por 3 o valor da quota alvo do jogador 2|3|4. No lado direito da linha verde são apresentados os resultados quando o somatório das cotas alvo é superior a 100%. É possível constatar que os *pay-off's* associados à parte esquerda da linha verde têm valores superiores comparados com o lado direito. Isto acontece uma vez que toda a potência é despachada e os preços de fecho de mercado são elevados (O preço de fecho foi marcado pela central eólica com valor de 76,1 €/MWh). Na Fig. 3.2.3.1 são apresentados os valores de quotas alvo de cada jogador em todas as simulações efetuadas em que:

$t_{2010} \longrightarrow$  Quota alvo jogador 2|3|4:  $A_{jog2|3|4} = 10\%$   
 $\text{teste} \begin{matrix} \downarrow \\ \downarrow \end{matrix} \longrightarrow$  Quota alvo jogador 1:  $A_{jog1} = 20\%$

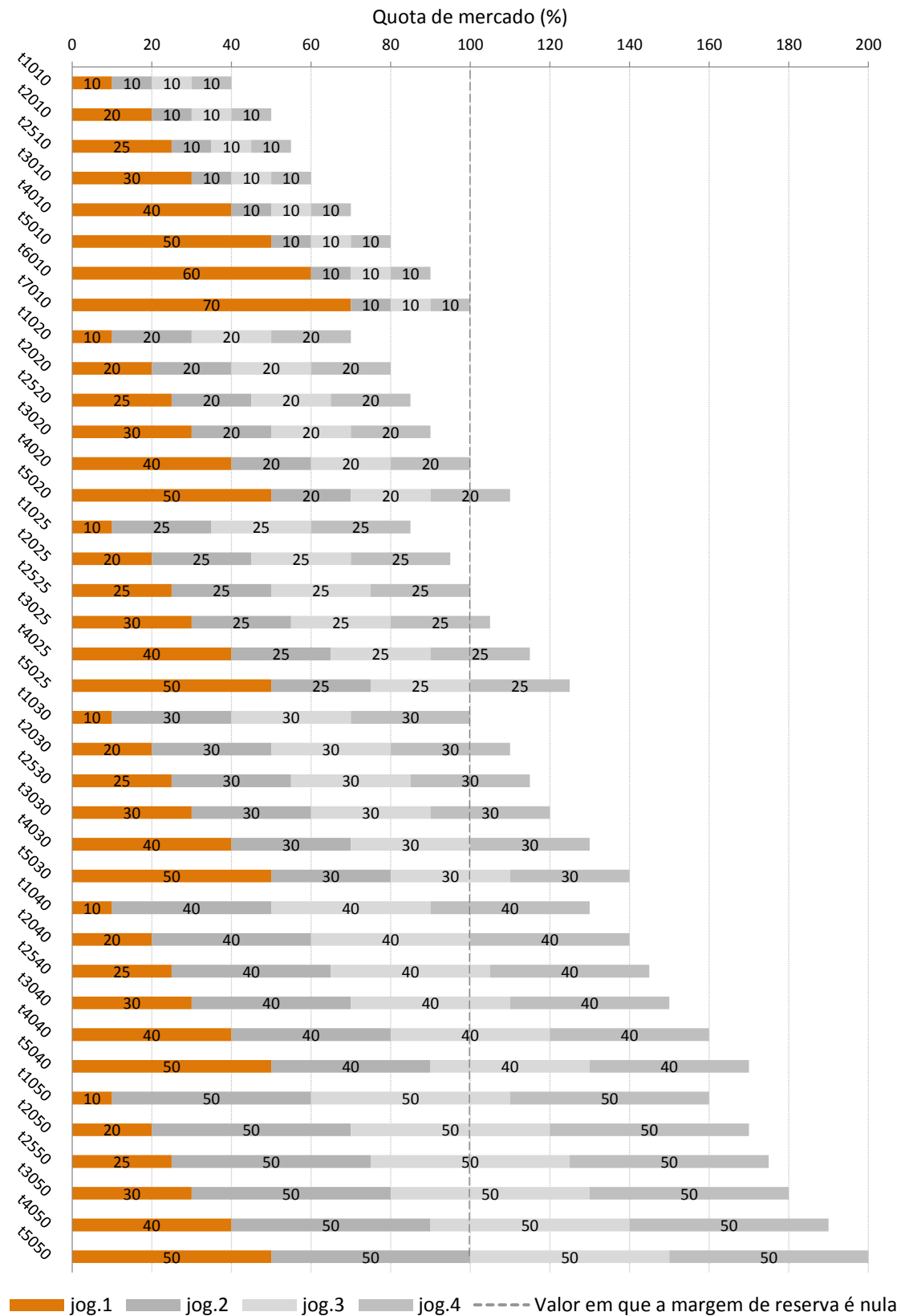


Fig. 3.2.3.1 – Valores de quotas alvo de cada jogador para cada teste realizado.

Analisando a Tabela 3.2.3.1 constata-se que existem quatro equilíbrios de Nash nas situações em que o somatório das quotas alvo é igual a 100%, portanto, pode-se concluir que, para qualquer valor de quota alvo, sempre que o somatório das quotas alvo de todos os participantes é 100% existe equilíbrio de Nash.

Os equilíbrios encontrados na Tabela 3.2.3.1 conduzem a pontos ótimos de Pareto, ou seja, existe uma situação tal que o lucro de um dos jogadores não pode melhorar sem que isto implique uma pior situação para o resto dos jogadores. Portanto, na Fig. 3.2.3.2 são apresentados todos os pontos de *pay-off* da Tabela 3.2.3.1 bem com o traçado da fronteira de Pareto para os pontos de equilíbrio.

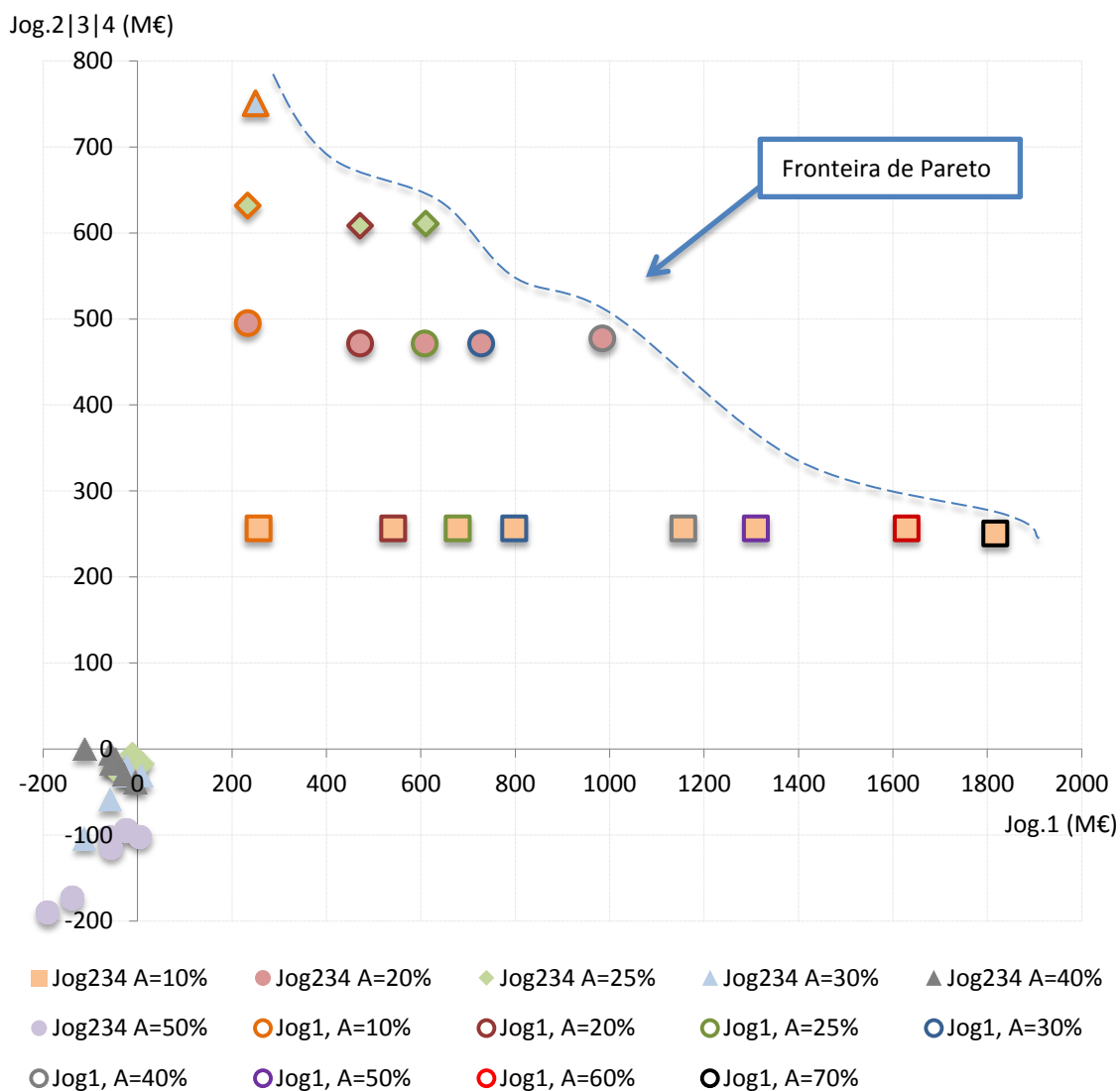


Fig. 3.2.3.2 – Traçado da fronteira de Pareto com valores obtidos na Tabela 3.2.3.1 em que a cor de fundo de cada ponto corresponde à quota alvo utilizada pelo jogador 2|3|4 e a cor da borda corresponde à quota alvo do jogador 1.

Na Fig. 3.2.3.2, os pontos de várias formas (e cores) representam os lucros dos jogadores, tendo em conta os diferentes pares de quotas alvo. A cor da borda está associada ao jogador 1, e a sua variação deve ser interpretada no eixo das abcissas (Jog.1), enquanto que a cor do fundo está associada ao jogador 2|3|4 e a sua variação deve ser interpretada no eixo das ordenadas (Jog.2|3|4).

A mancha de pontos que aparece no lado inferior esquerdo da Fig. 3.2.3.2 corresponde aos pontos em que pelo menos um dos jogadores tem lucro negativo, ou seja, na situação em que o somatório das quotas alvo é maior que 100%. É possível observar a diferença destes pontos para os pontos mais próximos da fronteira.

Em relação aos pontos mais perto da fronteira, na situação em que o somatório das quotas alvo é menor ou igual a 100%, observa-se que para qualquer um destes pontos que se mova para um valor mais alto, em qualquer um dos eixos, altera-se a cor associada ao fundo ou borda. Por exemplo, o ponto mais à direita da Fig. 3.2.3.2 em que a cor de fundo é laranja claro e a borda é de cor preta, que corresponde ao jogador 1 utilizar uma quota alvo de 70% e ao jogador 2|3|4 utilizar uma quota alvo de 10%, tem como resultado o seguinte lucro:

$$L(\text{Jog.1}; \text{Jog.2|3|4}) = [1817,1; 250,6] \text{ M€}.$$

Movendo-se para outro ponto com valor mais elevado no eixo das ordenadas, muda-se a cor de fundo e de borda, como é o caso do ponto mais acima na Fig. 3.2.3.2 em que a cor do fundo é azul claro e a cor da borda é laranja, corresponde ao jogador 1 utilizar uma quota alvo de 10% e ao jogador 2|3|4 utilizar uma quota alvo de 30%, e tem como resultado:

$$L(\text{Jog.1}; \text{Jog.2|3|4}) = [250,1; 750,5] \text{ M€}.$$

A partir de todas as simulações realizadas é também possível identificar, para cada quota alvo, qual a decisão de investimento no período inicial de cada simulação, veja-se Tabela 3.2.3.2.

Tabela 3.2.3.2 – Investimento no período inicial para cada quota alvo

Quota alvo	Investimento no período inicial
10 %	1 Carvão
20 %	1 Nuclear
25 %	1 Nuclear
30 %	1 Nuclear; 1 Hídrica
40 %	1 Nuclear; 1 Carvão
50 %	2 Nuclear
60 %	2 Nuclear; 1 Hídrica; 1 Eólica
70 %	2 Nuclear; 1 Carvão

Analisando a Tabela 3.2.3.2 observa-se para uma quota alvo de 10% a decisão de investimento recai numa central de carvão, visto que a potência alvo não é suficiente elevada para se investir numa central nuclear. Para as restantes quotas alvo a decisão recai em pelo menos uma central nuclear.



## 4.4 Equilíbrio de Nash para as diferentes estratégias de investimento

Tendo em conta as várias estratégias propostas, pretende-se analisar um par de estratégias de cada vez, por forma a examinar o seu impacto sobre o resultado na decisão de investimento. A Tabela 3.2.3.1 apresenta os resultados, tendo em conta o lucro dos jogadores para estratégias diferentes em que a quota alvo considerada é uma das quotas de equilíbrio encontradas no subcapítulo anterior, que no caso é de 25%.

Tabela 3.2.3.1 – Resumo de resultados tendo em conta o lucro dos jogadores para diferentes estratégias com quota alvo de 25%

		Jogador 2   3   4		
		Estratégia 1	Estratégia 2	Estratégia 3
Jogador 1	Estratégia 1	(166,8; 166,8)	(608,9; <b>627,1</b> )	(14,8; 40)
	Estratégia 2	( <b>329,4</b> ; 119,6)	(610,7; <b>610,7</b> )	( <b>29,3</b> ; -1,1)
	Estratégia 3	(295,3; 116)	( <b>649,7</b> ; <b>631,9</b> )	(-1,5; -1,5)

A partir das simulações realizadas foi possível identificar, para cada estratégia, qual a decisão de investimento no período inicial de cada simulação para uma quota alvo de 25%, veja-se Tabela 3.2.3.2.

Tabela 3.2.3.2 – Investimento no período inicial para cada quota alvo

Estratégia	Investimento no período inicial
1	2 CCGT; 1 Hídrica; 3 Eólica
2	1 Nuclear
3	24 Hídrica; 2 Eólica

De seguida são apresentados os resultados para o ponto de equilíbrio encontrado na Tabela 3.2.3.1. Neste ponto o jogador 1 utiliza a estratégia 3 – previsão dos custo médios e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2 – custo médio no período corrente.

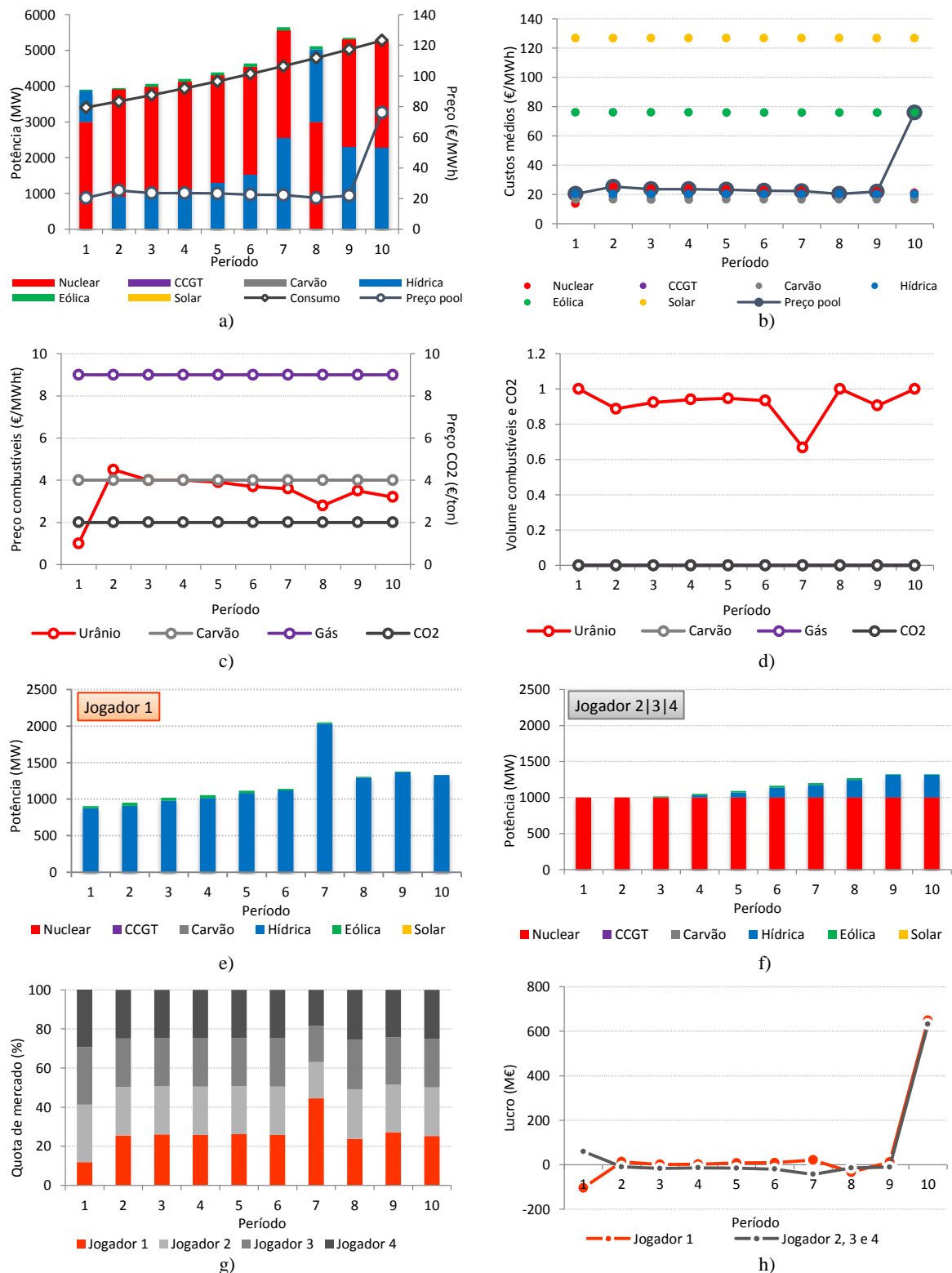


Fig. 3.2.3.1 – Resultado da simulação em que cada jogador tem uma quota alvo de 25%, onde o jogador 1 utiliza a estratégia 3 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2: a) Potência total instalada, consumo e preço de fecho de mercado; b) Custos médios das tecnologias em cada período com marcação de qual marcou o preço de fecho; c) Evolução dos preços de combustíveis e emissões de CO<sub>2</sub>; d) Volumes de combustíveis consumidos e de emissões de CO<sub>2</sub>; e) Potência instalada pelo jogador 1; f) Potência instalada pelo jogador 2|3|4; g) Quota de mercado atingida por cada jogador; h) Lucro obtido por cada jogador.

Na Tabela 3.2.3.3 e Tabela 3.2.3.4 são apresentadas as decisões de investimento e comercialização do jogador 1 e do jogador 2|3|4, respetivamente.

Tabela 3.2.3.3 – Decisões do jogador 1: a) investimento; b) comercialização

a)

Período	$p_t^A$ (MW)	Custos médios previstos (€/MWh)						Ordem de mérito	Decisão de investimento
		N	C	G	H	E	S		
-3	936	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	24 H; 2 E
-2	48	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	1 H; 2 E
-1	47	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	1 H; 2 E
0	61	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	2 H
1	49	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	1 H; 2 E
2	67	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	2 H
3	50	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	1 H; 2 E
4	998	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	26 H
5	101	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	3 H
6	104	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	3 H
7	0	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	
8	0	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	
9	0	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	
10	0	25,3	78,4	90,2	20,4	76,1	126,8	H; N; E; C; G; S	

b)

t	Nuclear		Carvão		CCGT		Hídrica		Eólica		Solar	
	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)
1							875	20,4	30	76,1		
2							910	20,4	40	76,1		
3							980	20,4	40	76,1		
4							1015	20,4	40	76,1		
5							1085	20,4	30	76,1		
6							1120	20,4	20	76,1		
7							2030	20,4	20	76,1		
8							1295	20,4	10	76,1		
9							1365	20,4	10	76,1		
10							1330	20,4				

Pela Tabela 3.2.3.3 a), é possível verificar que, tendo sido calculados os custos médios previstos de cada tecnologia, a decisão de investimento do jogador 1, que utiliza a estratégia 3, recai sobre centrais hídricas e eólicas.

Tabela 3.2.3.4 - Decisões do jogador 2|3|4: a) investimento; b) comercialização

a)

Período	$P_t^A$ (MW)	Custos médios (€/MWh)						Ordem de mérito	Decisão de investimento
		N	C	G	H	E	S		
-3	936	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 N
-2	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
-1	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
0	0	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	
1	38	13,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; C; G; H; E; S	1 H
2	56	25,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 3 E
3	61	23,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
4	46	23,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	1 H; 1 E
5	85	23,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H; 1 E
6	71	22,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	2 H
7	0	22,3	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
8	0	19,6	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	N; H; G; C; E; S	
9	0	21,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	
10	0	20,9	16,6	18,7	20,4	76,1	126,8	C; G; H; N; E; S	

b)

t	Nuclear		Carvão		CCGT		Hídrica		Eólica		Solar	
	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)	Q (MW)	$\pi$ (€/MWh)
1	1000	13,6										
2	1000	25,3										
3	1000	23,6							15	76,1		
4	1000	23,6					35	20,4	15	76,1		
5	1000	23,3					70	20,4	20	76,1		
6	1000	22,6					140	20,4	25	76,1		
7	1000	22,3					175	20,4	25	76,1		
8	1000	19,6					245	20,4	25	76,1		
9	1000	21,9					315	20,4	10	76,1		
10	1000	20,9					315	20,4	10	76,1		

Analisando-se os resultados deste ponto de equilíbrio, destacam-se as seguintes observações:

- Pela Tabela 3.2.3.3 a), é possível verificar que, tendo sido calculados os custos médios previstos de cada tecnologia, a decisão de investimento do jogador 1, que utiliza a estratégia 3, recai sobre centrais hídricas e eólicas.
- Para o jogador 2|3|4, a decisão de investimento recai sobre uma central nuclear, sendo ainda associadas centrais hídricas e eólicas quando a potência alvo é reduzida.

- No período 4 a potência alvo do jogador 1 é 998 MW, sendo que este investe em 26 centrais hídricas. Como referido anteriormente, a potência alvo analisa o período  $t+4$ , pois teve-se em conta o período de construção das centrais nucleares, mas quando se investe em centrais hídricas, o seu tempo de construção são três períodos, o que explica o maior valor de capacidade instalada no período 7.
- Analisando as Fig. 3.2.3.1 a), c) e d), é observado que no período 7 aproximadamente 1000 MW não são despachados no mercado. Esta situação origina que seja consumido menos urânio, Fig. 3.2.3.1 d), uma vez que os custos médios das centrais hídricas são menores que o das centrais nucleares. Como o consumo de urânio diminui, o preço deste também diminui, o que implica custos médios menores para as centrais nucleares.
- No período 8, como as centrais nucleares têm um custo médio inferior ao custo médio das centrais hídricas, a capacidade das centrais nucleares é toda despachada, enquanto o jogador 1, que tem na sua carteira de geração predominantemente centrais hídricas, marca o preço de fecho de mercado.
- Como no período 8 a capacidade das centrais nucleares é toda despachada, para os períodos 9 e 10, os custos médios das centrais hídricas são inferiores ao das centrais nucleares, o que resulta no despacho de toda a capacidade do jogador 1.
- Nos períodos 1 a 9 o preço de fecho de mercado varia entre 20,4 e 25,3 €/MWh, cobrindo unicamente os custos das centrais nucleares e hídricas, sendo o lucro associado a cada jogador aproximadamente nulo, veja-se Fig. 3.2.3.1 h). No último período de simulação, período 10, a tecnologia a marcar o preço de fecho é eólico (76,1 €/MWh), o que origina um lucro um pouco acima dos 600M€. O jogador 1 obtém um maior valor de lucro comparado com o jogador 2|3|4 (649,7M€ contra 631,9M€), uma vez que, sendo a potência total instalada despachada e a capacidade operacional de cada jogador ser aproximadamente a mesma, os custos associados ao jogador 1 (centrais hídricas) são inferiores aos custos do jogador 2|3|4 (centrais nucleares).
- Na Fig. 3.2.3.1g) é observada a quota de mercado atingida por cada jogador. Como referido, no período 7, o jogador 1 tem um maior valor de quota uma vez a sua capacidade é toda despachada. No último período, cada jogador atinge o seu objetivo de quota alvo, visto que a capacidade total instalada no mercado é despachada.

Na Tabela 3.2.3.5 são apresentados os resultados da última ronda de cada simulação efetuada para a Tabela 3.2.3.1, onde é possível verificar qual a carteira de geração de cada jogador, qual a tecnologia marcar o preço de fecho e qual o seu preço no último período.

Tabela 3.2.3.5 – Resultados do último período de cada simulação

	Tecnologias Jogador 1	Tecnologias Jogador 2 3 4	Tecnologia a marcar preço	Preço de fecho do mercado (€/MWh)
Jog1 E1 Jog2 3 4 E1	CCGT; Hídrica	CCGT; Hídrica	CCGT	56,7
Jog1 E1 Jog2 3 4 E2	CCGT; Hídrica	Nuclear; Hídrica; Eólica	Eólica	76,1
Jog1 E1 Jog2 3 4 E3	CCGT; Hídrica	Hídrica	CCGT	23,8
Jog1 E2 Jog2 3 4 E1	Nuclear; Hídrica; Eólica	CCGT; Hídrica	CCGT	46,4
Jog1 E2 Jog2 3 4 E2	Nuclear; Hídrica; Eólica	Nuclear; Hídrica; Eólica	Eólica	76,1
Jog1 E2 Jog2 3 4 E3	Nuclear; Hídrica; Eólica	Hídrica	Hídrica	20,4
Jog1 E3 Jog2 3 4 E1	Hídrica	CCGT; Hídrica	CCGT	45,7
Jog1 E3 Jog2 3 4 E2	Hídrica	Nuclear; Hídrica; Eólica	Eólica	76,1
Jog1 E3 Jog2 3 4 E3	Hídrica	Hídrica	Hídrica	20,4

Observando a Tabela 3.2.3.5, pode-se concluir que não existe vantagem em ser utilizada a estratégia 1, visto que a tecnologia investida por esta estratégia, CCGT, depende do preço do gás e das emissões de CO<sub>2</sub>, o que proporciona custos médios elevados, sendo que em todas as simulações efetuadas (exceto quando jog1 utiliza a estratégia 1 e os outros jogadores a estratégia 2) está a marcar preço para os outros jogadores.

No subcapítulo seguinte são apresentadas conclusões sobre as simulações e os resultados obtidos neste e no anterior subcapítulo.

## 4.5 Análise dos resultados

Neste capítulo foram apresentadas as simulações e os resultados obtidos, no qual se determinaram equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo e para um conjunto de estratégias.

No **subcapítulo 4.3** são determinados equilíbrios para diferentes valores de quotas de mercado. Foi estabelecida como estratégia base para estas simulações a estratégia 2 – custo médio no período corrente. Observando a Tabela 3.2.3.1 é possível retirar as seguintes conclusões:

- Existem quatro equilíbrios de Nash (t1030, t2525, t4020, t7010) que correspondem à situação em que o somatório das quotas alvo é igual a 100%, ou seja, para qualquer valor de quota alvo, sempre que o somatório das quotas alvo de todos os participantes é igual a 100%, existe equilíbrio de Nash. Por exemplo, para t1030 seria  $10\% + 3 \cdot 30\% = 100\%$ .
- A linha verde representada na Tabela 3.2.3.1 faz a divisão entre as duas seguintes situações: primeira, somatório das quotas alvo menor ou igual a 100% e segundo, somatório das quotas alvo maior que 100%. No lado esquerdo da linha verde, que corresponde à situação do somatório das quotas alvo de cada jogador é menor ou igual a 100%, os *pay-off's* têm valores superiores comparados com os do lado direito. Isto acontece uma vez que toda a potência é despachada e os preços de fecho de mercado são elevados (O preço de fecho, nestes casos, foi marcado pela central eólica com valor de 76,1 €/MWh).
- Na situação em que o somatório das quotas alvo é menor ou igual a 100%, cada jogador consegue aumentar o lucro à medida que vai aumentando o valor da quota alvo. Na situação em que existe capacidade que não é despachada, somatório das quotas alvo maior que 100%, o jogador 1 obtém melhores resultados nas simulações t4025, t4030, t1040 e t4050, enquanto que o jogador 2|3|4 apresenta maior lucro nas simulações t1040, t2040, t2540, t3025, t4025, t5040, t6040 e t7040. Pode-se concluir que, quando existir a informação que o somatório das quotas alvo for maior que 100%, a quota alvo a ser utilizada por cada jogador é de 40%, exceto na simulação t1040 em que a melhor resposta do jogador 1, à quota alvo de 40% utilizada pelos outros jogadores, é usar uma quota alvo de 10%.

- Nas simulações t5030 (soma das quotas = 140%), t5040 (170), t2050 (170), t2550 (175), t3050 (180), t4050 (190), t5050 (200), t6050 (210), t7050 (220) e t6030 (150) o lucro de pelo menos um dos jogadores é menor que -100M€. Considerando este valor como referência, em que valores inferiores a -100M€ correspondem a um prejuízo a evitar, é possível observar que, para cada um destes testes, um dos jogadores obtém mais lucro que o outro na situação em que tem uma quota alvo inferior ao seu oponente. É possível concluir que em quase todas as situações em existe muita capacidade que não é despachada (mais de 40% fica de fora do mercado), quanto menor a quota de mercado do jogador melhores são os resultados obtidos, visto que tendo menos potência instalada os custos associados são menores.

Na Fig. 3.2.3.2 pode-se observar a fronteira de Pareto, onde estão representados os pontos da Tabela 3.2.3.1. Cada ponto nesta figura corresponde a um par de quotas alvo utilizadas por cada jogador. A cor da borda está associada à quota alvo do jogador 1, e a cor do fundo está associada à quota alvo do jogador 2|3|4.

A mancha de pontos que aparece no lado inferior esquerdo da Fig. 3.2.3.2 corresponde à situação em que pelo menos um dos jogadores tem lucro negativo, ou seja, na situação em que o somatório das quotas alvo é maior que 100%. É possível observar a diferença destes pontos para os pontos mais próximos da fronteira, uma vez que realçam as duas situações já descritas anteriormente, quando o somatório das quotas alvo é maior que 100% e menor e igual a 100%.

No **subcapítulo 4.4** são determinados equilíbrios para as diferentes estratégias propostas. O modelo das estratégias de investimento desenvolvidas tem como objetivo preencher uma potência alvo calculada a partir de uma quota alvo. Para esta potência alvo existem várias opções de investimento por isso considerou-se três estratégias para a decisão de investimento: estratégia 1 – custo específico de investimento, estratégia 2 – custo médio no período corrente e estratégia 3 – previsão dos custos médios.

A Tabela 3.2.3.1 apresenta os resultados, tendo em conta o lucro dos jogadores para estratégias diferentes em que a quota alvo considerada é uma das quotas de equilíbrio encontradas no subcapítulo 4.3, que no caso é de 25%. De seguida serão analisadas as diferentes estratégias tendo em conta os resultados obtidos nesta tabela.



- Estratégia 1 – custo específico de investimento

Esta estratégia toma a decisão de investimento consoante o custo específico de investimento de cada central. Segunda a Tabela 3.2.1.1 e consoante a potência alvo, a decisão recai sobre centrais CCGT, podendo também investir em centrais hídricas e eólicas quando a potência alvo tem um valor menor.

Quando a estratégia 1 é utilizada contra a estratégia 2, é obtido um maior lucro para o jogador que o utiliza a estratégia 2. Isto sucede uma vez que, como os jogadores têm uma quota alvo igual, os custos médios associados ao jogador que utiliza a estratégia 1 são maiores do que os que utilizam a estratégia 2. Pode-se até verificar pela Tabela 3.2.3.5 que, quando o jogador 1 utiliza a estratégia 2 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 1, no último período de simulação, o jogador 2|3|4 está a marcar o preço para o jogador 1.

Observando o lucro dos jogadores para a estratégia 1 contra a estratégia 3, as conclusões são as mesmas que foram descritas atrás, sendo que, nas simulações (jog1 – E1, jog2|3|4 – E3) e (jog1 – E3, jog2|3|4 – E1), o preço de fecho de mercado foi marcado pelo jogador que utiliza a estratégia 1, veja-se Tabela 3.2.3.5.

Pode-se então concluir que não existe vantagem em ser utilizada esta estratégia. No entanto, se o orçamento fosse uma restrição das simulações (não ser irrestrito), e tendo à mesma o objetivo de quota, esta estratégia pode ser vantajosa em relação às outras.

- Estratégia 2 – custo médio no período corrente

Nesta estratégia é realizada uma ordem de mérito relativamente ao custo médio no período corrente e posteriormente é tomada a decisão de investimento. Esta estratégia, no período inicial, tem como decisão investir em centrais nucleares, veja-se Tabela 3.2.3.2.

Quando o jogador 1 utiliza a estratégia 2 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 1, o jogador 1 obtém um maior valor de lucro. Isto deve-se ao que já foi referido anteriormente, os custos médios associados ao jogador que utiliza a estratégia 1 são maiores do que os que utilizam a estratégia 2. Quando se sucede o inverso, o jogador 1 utiliza a estratégia 1 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2, o lucro obtido por ambos é elevado. Isto acontece porque como só um jogador tem centrais CCGT (jogador 1),

existe menos gás consumido, comparando com a situação anterior, e assim o preço do gás e emissões de CO<sub>2</sub> é menor.

Quando a estratégia 2 é utilizada contra a estratégia 3, destacam-se duas situações. Visto que na estratégia 3 é realizada a previsão dos custos médios, quando o jogador 1 utiliza esta estratégia e os outros jogadores utilizam a estratégia 2, o jogador 1 obtém maior lucro. Isto sucede uma vez que os custos médios do jogador 2|3|4 (centrais nucleares) são maiores que os custos médios associados ao jogador 1 (centrais hídricas). A outra situação, em que o jogador 1 utiliza a estratégia 2 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 3, o jogador 1 obtém mais lucro que os outros jogadores. Isto acontece visto que os custos médios da tecnologia nuclear (existe menos volume de urânio consumido comparado com a situação anterior) são menores que os custos médios das centrais hídricas, sendo que neste caso a tecnologia que marcou o preço de fecho de mercado foi hídrica (jogador 2|3|4), veja-se Tabela 3.2.3.5. Portanto pode-se concluir que quando vários jogadores estão a prever os custos médios (estratégia 3), perde-se o efeito da previsão, e a melhor resposta é a estratégia 2.

Pode-se também constatar que quando a estratégia 2 é utilizada pelo jogador 2|3|4, esta é a melhor resposta às outras estratégias, sendo que o equilíbrio de Nash corresponde à situação que o jogador 1 utiliza a estratégia 3 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2. Pode-se justificar esta situação pelo facto de quando se realizaram as simulações para encontrar as quotas alvo de equilíbrio, a estratégia base utilizada foi a estratégia 2.

- Estratégia 3 – previsão dos custos médios

Nesta estratégia são previstos os custos médios para quando as tecnologias entram em operação. Esta estratégia pretende ser uma melhoria à estratégia 2. No período inicial, tem como decisão investir em centrais de origem renovável nomeadamente centrais hídricas e eólicas (Veja-se Tabela 3.2.3.2).

Quando esta estratégia é utilizada contra a estratégia 2, as conclusões são as mesmas que as descritas anteriormente. Na situação que só um jogador utiliza esta estratégia e os outros a estratégia 2, o jogador 1 obtém maior lucro. Na situação inversa, em que existem vários jogadores a prever os custos médios, a previsão perde o efeito e o jogador 1 tem mais lucro que o jogador 2|3|4.

Observa-se ainda que quando todos jogadores utilizam a estratégia 3, o lucro no último período da simulação é aproximadamente nulo, sendo negativo ( $L_{10} = -1,5\text{M€}$ ). Visto que a potência total instalada no mercado é hídrica, o preço de fecho de mercado é estabelecido pela central hídrica (veja-se Tabela 3.2.3.5) e portanto as receitas serão iguais aos custos, sendo que nesta simulação 40,2 MW não foram despachados, e tendo em conta os custos de investimento (custos fixos), é explicado o lucro igual a -1,5M€.

Pode-se ainda concluir que, tanto no subcapítulo 4.3 como no subcapítulo 4.4, para todas as simulações efetuadas, em nenhum caso se investiu na tecnologia solar. Isto sucedeu porque, comparando a central solar com a central eólica, como ambas fornecem aproximadamente o mesmo valor de potência, 6 MW para uma central solar e 5 MW para uma central eólica, e como as estratégias propostas têm em conta os custos, a decisão de investimento nunca recai em centrais solares devido aos seus altos custos fixos (que para fontes renováveis estes custos são iguais aos seus custos médios).



## Capítulo 5

---

### Conclusões e desenvolvimento futuro

*No presente capítulo são apresentadas as conclusões retiradas ao longo do desenvolvimento desta dissertação. São abordadas ainda, algumas sugestões para futuro desenvolvimento do trabalho apresentado.*



## 5.1 Principais aspetos e síntese de resultados

A liberalização do setor elétrico permitiu aumentar a competitividade das empresas nas atividades de produção e comercialização, e consequentemente a sua eficiência. Após a reestruturação do setor elétrico, surgiram vários modelos para a estrutura do mercado, tais como: bolsa ou pool, contratos bilaterais e mistos. No mercado em bolsa incluem-se os mecanismos de curto prazo, em que se pretende equilibrar a produção e o consumo. Este mercado baseia-se em licitações de ofertas de preços e volumes, sendo que a interseção das curvas de oferta e de procura estabelece o preço de mercado. O modelo de contratos bilaterais permite realizar transações diretamente entre duas entidades interessadas, em que os preços, os termos e as condições são negociados livremente. O mercado misto combina os dois modelos anteriores.

Com a introdução da concorrência no setor da geração, o processo de investimento é agora uma consequência de decisões individuais com o objetivo de maximizar o lucro da empresa. As decisões de investimento têm um forte impacto sobre os resultados a longo prazo das empresas pois estão expostos a certos fatores de risco tais como os preços dos combustíveis e CO<sub>2</sub>, o consumo e a produção renovável, entre outras.

Um dos métodos utilizados pelas empresas a fim de levar a cabo uma decisão de investimento eficiente é aquele em que esta dissertação se foca, que é a utilização da teoria dos jogos. Um dos conceitos da teoria dos jogos é o equilíbrio de Nash, que corresponde ao(s) resultado(s) do jogo em que nenhum jogador tem incentivo em alterar unilateralmente a sua estratégia, ou seja cada jogador ficaria pior se jogasse uma estratégia diferente da que joga no equilíbrio, quando todos os outros também jogam a estratégia do equilíbrio.

Portanto, o objetivo da presente dissertação foi estabelecer uma metodologia para três estratégias de investimento (estratégia 1 – custo específico de investimento, estratégia 2 – custo médio no período corrente e estratégia 3 – previsão do custo médio), onde utilizando a teoria dos jogos, encontraram-se equilíbrios de Nash para um conjunto de quotas alvo e para o conjunto das estratégias desenvolvidas. Estas estratégias foram implementadas e experimentadas no simulador ITEM-Game.

Para um conjunto de quotas alvo definidas para cada um dos jogadores, foi utilizada como estratégia base de investimento a estratégia 2 – custo médio no período corrente.

Foi construída a matriz de *pay-off's*, da qual é possível concluir que quando o somatório das quotas alvo de todos os jogadores é igual a 100%, existe um equilíbrio de Nash. Isto sucede uma vez que toda a potência é despachada e os preços de fecho de mercado são elevados.

Pode-se ainda concluir que na situação em que o somatório das quotas é maior que 100%, a quota alvo a ser utilizada por cada jogador é de 40%, exceto na simulação t1040 em que a melhor resposta do jogador 1, à quota alvo de 40% utilizada pelos outros jogadores, é usar uma quota alvo de 10%. Em quase todos os casos em que existe muita capacidade que não é despachada (mais de 40% da potência total instalada fica de fora do mercado), quanto menor a quota de mercado do jogador melhores são os resultados obtidos visto que tendo menos potência instalada os custos associados são menores.

O modelo das estratégias de investimento desenvolvidas tem como objetivo preencher uma potência alvo calculada a partir de uma quota alvo. Para esta potência alvo existem várias opções de investimento por isso consideram-se três estratégias para a decisão de investimento: Estratégia 1 – custo específico de investimento, Estratégia 2 – custo médio no período corrente e Estratégia 3 – previsão dos custos médios. Portanto, para este conjunto de estratégias, também construiu-se uma matriz de *pay-off's* em que a quota alvo é de 25% (que é uma das quotas alvo de equilíbrio). Fazendo uma análise à matriz de *pay-off's* pode-se concluir o seguinte de cada estratégia:

- **Estratégia 1** – custo específico de investimento: Esta estratégia toma a decisão de investimento consoante o custo específico de investimento de cada central, portanto, a decisão recai em centrais CCGT. Pode-se concluir que não existe vantagem em ser utilizada esta estratégia, visto que a tecnologia investida por esta estratégia, CCGT, depende do preço do gás e das emissões de CO<sub>2</sub>, o que proporciona custos médios elevados, sendo que em todas as simulações efetuadas (exceto quando jog1 utiliza a estratégia 1 e os outros jogadores a estratégia 2) está a marcar preço para os outros jogadores. No entanto, se o orçamento fosse uma restrição das simulações (não ser irrestrito), e tendo à mesma o objetivo de quota, esta estratégia pode ser vantajosa em relação às outras.
- **Estratégia 2** – custo médio no período corrente: Nesta estratégia é realizada uma ordem de mérito relativamente ao custo médio no período corrente e posteriormente



é tomada a decisão de investimento, que recai quase sempre centrais nucleares (exceto quando a quota alvo é 10%, e a decisão recai sobre uma central de Carvão). Pode-se constatar pela matriz de *pay-off's* que a estratégia 2 é a melhor resposta às outras estratégias, sendo que o equilíbrio de Nash corresponde à situação que o jogador 1 utiliza a estratégia 3 e o jogador 2|3|4 utiliza a estratégia 2. Pode-se justificar a melhor resposta dada por esta estratégia pelo facto de quando se realizaram as simulações para encontrar as quotas alvo de equilíbrio, a estratégia utilizada foi a estratégia 2.

- **Estratégia 3** – previsão dos custos médios: Nesta estratégia são previstos os custos médios para quando as tecnologias entram em operação. Esta estratégia pretende ser uma melhoria à estratégia 2 e a sua decisão de investimento recai em fontes renovável nomeadamente centrais hídricas e eólicas. Quando esta estratégia é utilizada contra as outras estratégias, verificam-se duas situações de salientar. Na situação em que só um jogador utiliza a estratégia 3, este obtém maior lucro. Na situação contrária, em que vários jogadores utilizam esta estratégia, este obtém piores resultados em relação aos outros jogadores. Portanto pode-se concluir que quando vários jogadores estão a prever os custos médios (Estratégia 3), perde-se o efeito da previsão.

Observa-se ainda que quando todos jogadores utilizam a estratégia 3, o lucro é praticamente nulo. Visto que a potência total instalada no mercado é hídrica, o preço de fecho de mercado é estabelecido pelos custos médios da central hídrica e portanto as receitas são praticamente iguais aos custos.

Pode-se ainda concluir que para todas as simulações efetuadas, em nenhum caso se investiu na tecnologia solar. Isto sucedeu porque, comparando a central solar com a central eólica, como ambas fornecem aproximadamente o mesmo valor de potência, 6 MW para uma central solar e 5 MW para uma central eólica, e como as estratégias propostas têm em conta os custos, a decisão de investimento nunca recai em centrais solares devido aos seus altos custos fixos (que para as fontes renováveis são iguais aos seus custos médios).

## 5.2 Desenvolvimento futuro

Em termos de trabalho futuro, existem muitas linhas de desenvolvimento que podem ser seguidas, pois o tempo disponível não permitiu abordar todos os aspetos inerentes à complexidade dos mercados de energia liberalizados. Algumas das linhas a seguir seriam:

- Nesta dissertação utilizou-se um conjunto de quotas alvo, do qual se obtiveram Equilíbrios de Nash onde a estratégia de investimento utilizada foi a estratégia 2. Num trabalho futuro, podiam ser também utilizadas as estratégias 1 e 3 e verificar se as quotas alvo de equilíbrio são as mesmas;
- Utilizar o orçamento como restrição de investimento com o objetivo de verificar se a estratégia 1 é mais vantajosa que as outras duas estratégias;
- A partir dos resultados de cada ronda, saber quais as tecnologias que os outros jogadores têm instaladas e assim fazer uma previsão dos preços mais exata;
- Utilizando um algoritmo de otimização, encontrar Equilíbrios de Nash de maneira mais rápida, em vez de fazer uma simulação de cada vez;
- Estimar valores do consumo e dos preços de combustíveis e CO<sub>2</sub> em cada ronda;
- Realizar as simulações para um número diferente de jogadores e verificar se as conclusões são as mesmas em relação ao somatório das quotas alvo;
- Utilizar funções de maximização de lucro;
- Prever valores para o preço de fecho de mercado.

## Referências bibliográficas

- [1] P. L. Joskow, “Competitive electricity markets and investment in new generating capacity,” *MIT Center for Energy and Environmental Policy Research*, 2006.
- [2] “Power Generation Investment in Electricity Markets,” [Online]. Disponível em: <http://www.hks.harvard.edu/hepg/Papers/Fraser.gen.invest.elec.mkts.1203.pdf>. [Acedido em 13 2014].
- [3] “Projected Costs of Generating Electricity,” [Online]. Disponível em: [www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected\\_costs.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected_costs.pdf). [Acedido em 13 2014].
- [4] P. L. Joskow, “Restructuring, Competition and Regulatory Reform in the U.S. Electricity Sector,” *Journal of Economic Perspectives*, vol. 11 (3), pp. 119-138, 1997.
- [5] M. P. Schinkel, “Disequilibrium theory: Reflections towards a Revival of Learning,” *Universitaire Pers Maastricht*, Holanda, 2001.
- [6] “Investment and Trading in Electricity Markets Game (ITEM-Game),” [Online]. Disponível em: <https://www.item-game.org/>. [Acedido em 13 2014].
- [7] J. Sousa, P. Trigo e P. Marques, “ITEM-Game,” [Online]. Disponível em: [http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/jsousa/Doc/ITEM2011/ITEM\\_emg.pdf](http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/jsousa/Doc/ITEM2011/ITEM_emg.pdf). [Acedido em 18 2 2014].
- [8] F. Olsina, “Long-Term Dynamics of Liberalized Electricity Markets,” *Universidad Nacional de San Juan*, Argentina, 2005.
- [9] J. J. S. Domínguez, “Strategic Analysis of the Long-Term Planning of Electric Generation Capacity in Liberalised Electricity Markets,” *UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS DE MADRID*, Madrid, 2008.
- [10] International Energy Agency (IEA), “World Energy Investment Outlook,” França, 2003.
- [11] E. Dimson, “The discount rate for a power station,” *Energy Economics, Elsevier*, vol. 11 (3), pp. 175-180, 1989.

## Referências bibliográficas

- [12] J. F. Nash, “Equilibrium Points in N-Person Games,” *Proceedings of the National Academy of Science*, vol. 36, pp. 48-49, 1950.
- [13] J. Bertrand, “Book review of theorie mathematique de la richesse sociale and of recherches sur les principes mathematiques de la theorie des richesses,” *Journal de Savants*, vol. 67, pp. 499-508, 1883.
- [14] A. Cournot, *Researches into Mathematical Principles of the Theory of Wealth*, New York: [English translation by Nathaniel T. Bacon, 1897], 1838.
- [15] H. v. Stackelberg, *Markform and Gleichgewicht (Market Structure and Equilibrium)*, Viena, Austria: [English Translated by Bazin, Damien, Hill, Rowland, Urch, Lynn, 2011], 1934.
- [16] F. H. Murphy e Y. Smeers, “Generation capacity expansion in imperfectly competitive restructured electricity markets,” *CORE Discussion Papers: 2002/69*, 2002.
- [17] M. Ventosa, R. Denis e C. Redondo, “Expansion Planning in Electricity Markets. Two Different Approaches,” em *Proceedings of the 14th PSCC*, Sevilha, Espanha, 2002.
- [18] E. Centeno, J. Reneses, R. García e J. J. Sánchez, “Long-term Market Equilibrium Modelling for Generation Expansion Planning,” em *IEEE Power Tech*, Bolonha, Itália, 2003.
- [19] ERSE, “Anúncio de Proposta de Regulamentação,” Lisboa, 1997.
- [20] ERSE, “Liberalização do Sector,” [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/liberalizacaodosector/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 14 12 2013].
- [21] Conselho de Reguladores do MIBEL, “Descrição do funcionamento do MIBEL,” 2009.
- [22] EDP Geração, “CHALLENGE, EDP UNIVERSITY,” 2013. [Online]. Disponível em: [http://geracaoedp.edp.pt/universitychallenge/pdf/briefing\\_2014.pdf](http://geracaoedp.edp.pt/universitychallenge/pdf/briefing_2014.pdf). [Acedido em 9 4 2014].
- [23] ERSE, “Resumo informativo Mercado Liberalizado Eletricidade,” Portugal, Maio 2014.

- [24] EDP, “Dado Ibéricos 2012,” Julho 2013. [Online]. Disponível em: [http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/Dados%20Ibricos/DadosIbericosJulho2013\\_PT.pdf](http://www.edp.pt/pt/aedp/sectordeenergia/Dados%20Ibricos/DadosIbericosJulho2013_PT.pdf). [Acedido em 12 5 2014].
- [25] Ofgem, “The review of the first year of NETA - Volume 1,” Reino Unido, Julho 2002.
- [26] Ofgem/DTI, “BETTA User Guide,” Reino Unido, Fevereiro 2005.
- [27] Department of Energy & Climate Change, “Digest of UK energy statistics (DUKES) and Electricity statistics,” 2013. [Online]. Disponível em: [https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment\\_data/file/279546/DUKES\\_2013\\_Chapter\\_5.pdf](https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/279546/DUKES_2013_Chapter_5.pdf). [Acedido em 17 7 2014].
- [28] Nord Pool Spot, [Online]. Disponível em: <http://www.nordpoolspot.com>. [Acedido em 17 7 2014].
- [29] NVE - Norwegian Water Resources and Energy Directorate, “National Report,” Noruega, 2011.
- [30] NVE - Norwegian Water Resources and Energy Directorate, “Electricity disclosure,” 2011. [Online]. Disponível em: <http://www.nve.no/en/Electricity-market/Electricity-disclosure-2011/>. [Acedido em 17 7 2014].
- [31] Powernext, “Regulators,” [Online]. Disponível em: [http://www.pownext.com/#sk;tp=app;n=page;f=getPage;t=page;fp=system\\_name:Company\\_Profile;lang=en\\_US;m=Powernext\\_Group](http://www.pownext.com/#sk;tp=app;n=page;f=getPage;t=page;fp=system_name:Company_Profile;lang=en_US;m=Powernext_Group). [Acedido em 17 7 2014].
- [32] Selectra, “Parts de marché des fournisseurs d'énergie en France,” 19 3 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.selectra.info/Parts-de-marche-des-fournisseurs-d-energie-en-France.html>. [Acedido em 17 7 2014].
- [33] Energie Moins Chere, “La liste des fournisseurs,” [Online]. Disponível em: <http://www.energiemoinschere.com/liste-operateur-residentiel.html>. [Acedido em 17 7 2014].
- [34] EDF - Électricité de France, “Transmission - The network,” [Online]. Disponível em: <http://activites.edf.com/transport/transport-d-electricite-39.html>. [Acedido em 17 7 2014].

## *Referências bibliográficas*

- [35] CRE - Commission de Régulation de L'Énergie, "Wholesale electricity, CO2, and gas market functioning - 2012-2013 report," França, 2013.
- [36] Joachim Rudo - Attorney-at-law, "German Energy Law," [Online]. Disponível em: <http://www.energylaw.de/>. [Acedido em 18 7 2014].
- [37] Bundesbetzagentur - BNetzA, "Report - Monitoringreport 2012," Alemanha, 2013.
- [38] EEX - The European Energy Exchange , [Online]. Disponível em: <https://www.eex.com/en/about/eex>. [Acedido em 18 7 2014].
- [39] EEX - European Energy Exchange AG, "EEX Product Brochure," 2 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.eex.com/blob/68250/27b48c17c6925d18d84f5607d9a51d30/e-eex-unternehmen-februar-2014-pdf-data.pdf>. [Acedido em 18 7 2014].
- [40] EEX - European Energy Exchange AG, "List of Trading Participants," 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.eex.com/en/trading/list-of-trading-participants#/list-of-trading-participants>. [Acedido em 18 7 2014].
- [41] GME - Gestore Mercati Energetici, "about the electricity market - introduction," [Online]. Disponível em: <https://www.mercatoelettrico.org/En/Mercati/MercatoElettrico/IlMercatoElettrico.aspx>. [Acedido em 18 7 2014].
- [42] ENEL, [Online]. Disponível em: [http://www.enel.com/en-GB/group/about\\_us/](http://www.enel.com/en-GB/group/about_us/). [Acedido em 18 7 2014].
- [43] AEEG, "Structure, prices and quality in the electricity sector," 2010. [Online]. Disponível em: [http://www.autorita.energia.it/allegati/relaz\\_ann/10/volI\\_%20cap2\\_en.pdf](http://www.autorita.energia.it/allegati/relaz_ann/10/volI_%20cap2_en.pdf). [Acedido em 18 7 2014].
- [44] Francesco Cariello, "The Regulatory Authority for Electricity and Gas," 6 10 2008. [Online]. Disponível em: [http://www.industrie.gov.tn/fr/projetelmed/images/pdf/10\\_Italian\\_market.pdf](http://www.industrie.gov.tn/fr/projetelmed/images/pdf/10_Italian_market.pdf). [Acedido em 18 7 2014].

- [45] GME - Gestore Mercati Energetici, “list of market participants,” [Online]. Disponível em:  
<https://www.mercatoelettrico.org/En/Mercati/MercatoElettrico/ElencoOperatori.aspx>.  
[Acedido em 18 7 2014].
- [46] EXAA Energy Exchange Austria, “EXAA Companybrochure,” 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.exaa.at/exaa/docs/exaa-brochure-2014-web.pdf>. [Acedido em 18 7 2014].
- [47] E-Control, “Public Grid - Year 2013,” [Online]. Disponível em: <http://www.e-control.at/de/statistics/electricity-statistics/year2013>. [Acedido em 18 7 2014].
- [48] EURELECTRIC - The Union of the Electricity Industry , “Power Distribution in Europe,” 2013. [Online]. Disponível em:  
[http://www.eurelectric.org/media/113155/dso\\_report-web\\_final-2013-030-0764-01-e.pdf](http://www.eurelectric.org/media/113155/dso_report-web_final-2013-030-0764-01-e.pdf).  
[Acedido em 18 7 2014].
- [49] PIQUE - PRIVATISATION OF PUBLIC SERVICES AND THE IMPACT ON QUALITY, EMPLOYMENT AND PRODUCTIVITY , “Liberalisation, privatisation and regulation in the Austrian electricity sector,” 11 2006. [Online]. Disponível em:  
[http://www.pique.at/reports/pubs/PIQUE\\_CountryReports\\_Electricity\\_Austria\\_November2006.pdf](http://www.pique.at/reports/pubs/PIQUE_CountryReports_Electricity_Austria_November2006.pdf). [Acedido em 18 7 2014].
- [50] E-Control, “MARKET REPORT 2012,” [Online]. Disponível em: <http://www.e-control.at/portal/page/portal/medienbibliothek/publikationen/dokumente/pdfs/econtrol-market-report-engl-2012.pdf>. [Acedido em 18 7 2014].
- [51] POLPX - Towarowa Giełda Energii SA , “History of POLPX,” [Online]. Disponível em:  
<http://www.tge.pl/en/9/history-of-polpx>. [Acedido em 18 7 2014].
- [52] PIQUE - PRIVATISATION OF PUBLIC SERVICES AND THE IMPACT ON QUALITY, EMPLOYMENT AND PRODUCTIVITY, “Liberalisation, privatisation and regulation in the Polish electricity sector,” Polónia, 2006.
- [53] Econnect - Energising Renewables, “The National Electricity Market - Econnect Australia,” Austrália, 2007.
- [54] AER - Australian Energy Regulator, “STATE OF THE ENERGY MARKET,” Austrália, 2013.

## *Referências bibliográficas*

- [55] Paul L. Joskow, “WHOLESALE ELECTRICITY MARKET DEVELOPMENTS IN THE U.S.,” Cambridge - MIT Institute Electricity Project, Cambridge, England, 2014.
- [56] Navigant, “Evolution of the Electric Industry Structure in the U.S. and Resulting Issues ,” Electric Markets Research Foundation , Washington DC, EUA, 2013.
- [57] PJM, “Annual Report,” 2013. [Online]. Disponível em: <http://www.pjm.com/about-pjm/who-we-are/annual-report.aspx>. [Acedido em 18 7 2014].
- [58] W. E. Walsh, R. Das, G. Tesauro e J. O. Kephart, “Analyzing Complex Strategic Interactions in Multi-Agent Systems,” *Game Theoretic and Decision Theoretic Agents Workshop, American Association for Artificial Intelligence*, pp. 109-118, 2002.
- [59] J. Tirole, “The Theory of Industrial Organization,” *The MIT press*, 1988.
- [60] ERSE, “Mercado Retalhista de Eletricidade,” [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/MercadoRetalhista/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 13 5 2014].
- [61] ERSE, “Mercado Grossista de Electricidade,” [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/supervisaodemercados/mercadodeelectricidade/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 13 5 2014].
- [62] ERSE, “Preços de Eletricidade em 2014,” 1 1 2014. [Online]. Disponível em: <http://www.erse.pt/pt/electricidade/tarifaseprecos/precosdeelectricidade/Paginas/default.aspx>. [Acedido em 13 12 2014].



# Anexo A

## Tutorial de simulação

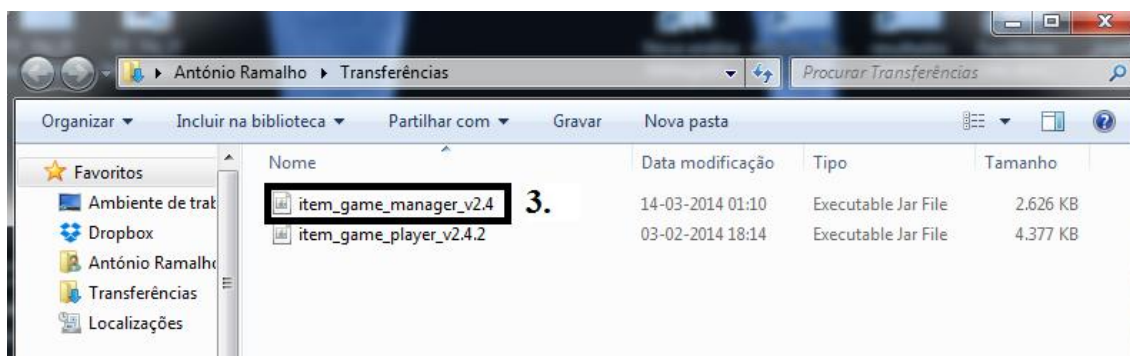
1. Primeiro é necessário estar registado como utilizador do ITEM-Game. Para isso é preciso ir ao site [www.item-game.org](http://www.item-game.org) (Se estiver registado no ITEM-Game e possuir o *username* e a *password* não é necessário registo);
2. Fazer *download* dos ficheiros “ITEM-Game player” e “ITEM Game manager”.

The screenshot shows the ITEM-Game website interface. At the top, the logo "item game" is displayed with the tagline "Investment and Trading in Electricity Markets". Below the logo, there are navigation links for "Home" and "Contact Us". The main content area is titled "Welcome" and contains a paragraph describing the game. Below this, there is a "Get Started" section with three steps: STEP 1: If you are a new user register to get your username and password on your email; STEP 2: Download the ITEM-Game Player; STEP 3: Run the ITEM-Game Player on your computer using your username and password. To the right of the website content, there are two forms: "Register" and "Recover Password". The "Register" form has fields for "First and Last Name", "Email", "Institution", and "Country", along with "Submit" and "Clear" buttons. The "Recover Password" form has a field for "Email" and "Submit" and "Clear" buttons. Below the website content, there is a "Download item game" section with a table listing the download links for "ITEM-Game Player v2.4" and "ITEM-Game Manager v2.4".

1.

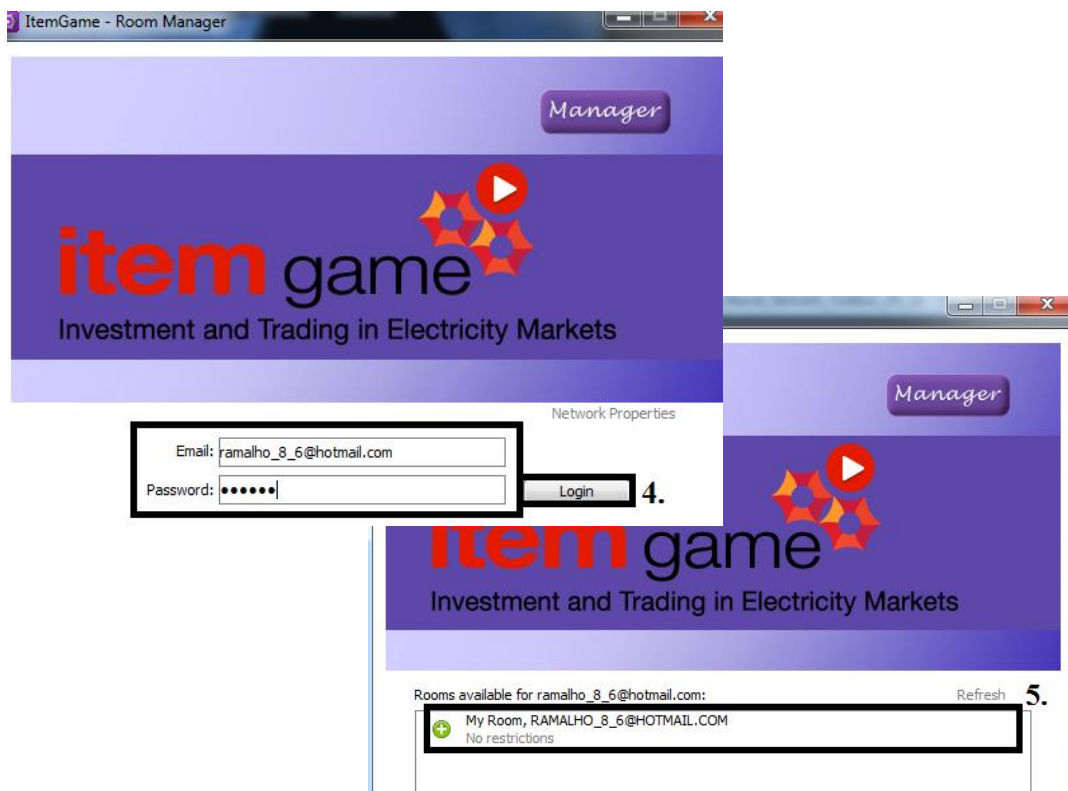
Nome	Data modificação	Tipo	Tamanho
ITEM-Game Player v2.4 To play games (does not include Java JRE )	June 17, 2013	4.27 MB	
ITEM-Game Manager v2.4 To create new games (does not include Java JRE )	June 17, 2013	2.55 MB	

3. Clicar duas vezes no ficheiro “item\_game\_manager” para se criar o jogo.



## Anexo A

4. Preencher os campos “Email” e “Password” e depois carregar “login”;
5. Clicar duas vezes em “My Room,(...)”;



6. Na janela que aparece é necessário preencher os seguintes campos:

**Room Name :**  
My Room  
RAMALHO\_8\_6@HOTMAIL.COM

**Room Type :** MultiGame  
Private Yes  
**Games Restriction :** No  
**Time Restriction :** No  
[www.item-game.com](http://www.item-game.com)

**Create Game**

**General Information**  
Name: mail.com\_2014-07-15 09:50:00 GMT  
Short Name: simulacao  
Periods: 14  
Investment Cycle: 1  
Begin time [GMT]: 2014-07-15 09:50:00

**Demand**  
Initial [MW]: 2800  
Rate [%]: 5

**Prices**  
Max. Pool Price: 180  
Uranium [€/MWh]: 1  
Coal [€/MWh]: 4  
Gas [€/MWh]: 9  
CO2 [€/ton]: 2

**Time**  
Period View [min] Play [min]  
Default 1 1

**Players**  
Available (0)  
To Play (4)  
To Invite (0)  
Add Players  
Alert (by email) ☐  
Invite (by email) ☒

**Portfolio**  
Budget [M€]: 10000

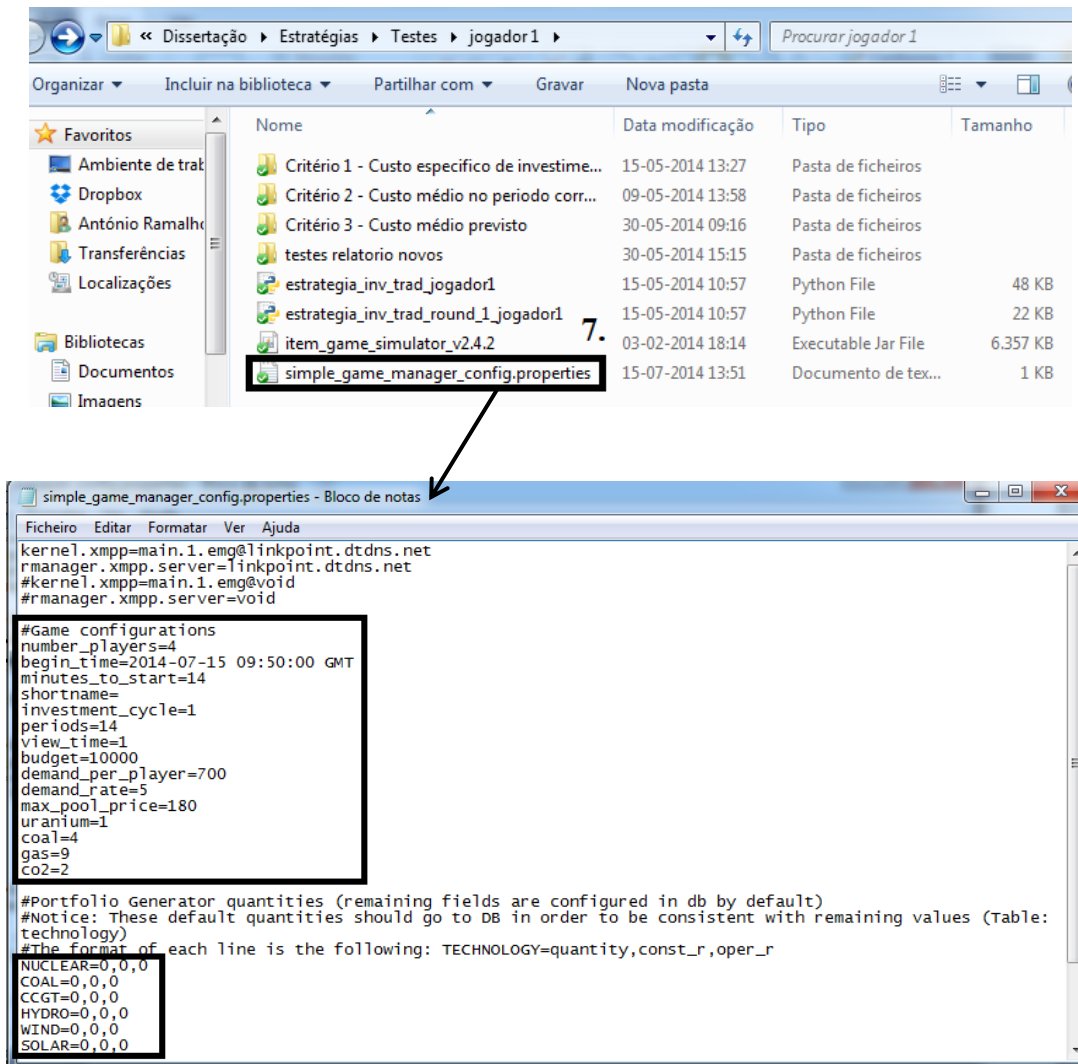
Name	Capacity	%	Emission	Cost	Quantity	Const_R	Oper_R
NUCLEAR	1000.0	30.0	0.0	900.0	0	4	10
COAL	500.0	40.0	1.0	160.0	0	3	8
CCGT	400.0	60.0	0.4	60.0	0	2	6
HYDRO	100.0	35.0	0.0	50.0	0	3	8
WIND	20.0	25.0	0.0	20.0	0	1	6
SOLAR	20.0	30.0	0.0	40.0	0	1	6

- a. Introduzir no campo “name” o seguinte: Email do manager + \_ + data da simulação (ano-mês-dia hora:minutos:segundos) + GMT. Exemplo: ramalho\_8\_6@hotmail.com\_2014-07-15 09:50:00 GMT;
- b. No campo “begin time [GMT]” definir qual a data e hora do início da simulação;
- c. Nos campos “Periods” e “Investment Cycle” preencher com o número de períodos de simulação e de quantos em quantos períodos se realiza investimento, respetivamente. Nas simulações efetuadas utilizou-se 14 períodos e podia-se investir em todos os períodos;
- d. Neste campo é definido o tempo de visualização dos resultados, “view time”, e o tempo em que se fazem as decisões, “play time”. Nas simulações realizadas foi considerado um minuto para cada um destes tempos;
- e. Nestes campos são definidos os preços iniciais dos combustíveis e das emissões de CO<sub>2</sub>, onde também é definido o preço máximo de licitação (“Max. Pool Price”).
- f. Neste campo são introduzidos os jogadores. Nas simulações efetuadas utilizaram-se quatro jogadores;
- g. Nestes campos é definido o consumo inicial e qual a taxa de crescimento. Nas simulações realizadas utilizou-se um consumo inicial de 2800 MW com uma taxa de crescimento de 5%;
- h. Neste campo é definido o orçamento de cada jogador. Nos casos práticos foi considerado um valor suficiente elevado de modo a não ser uma restrição na decisão de investimento.
- i. Nestes campos são definidas com quantas e quais as centrais que se começa a simulação. Nas simulações efetuadas foi considerado que cada jogador começa sem unidades de geração.
- j. Por fim, tendo os todos os campos referidos anteriormente preenchidos, clicar em “Create Game”, sendo que se tudo estiver corretamente preenchido, aparece a seguinte mensagem:

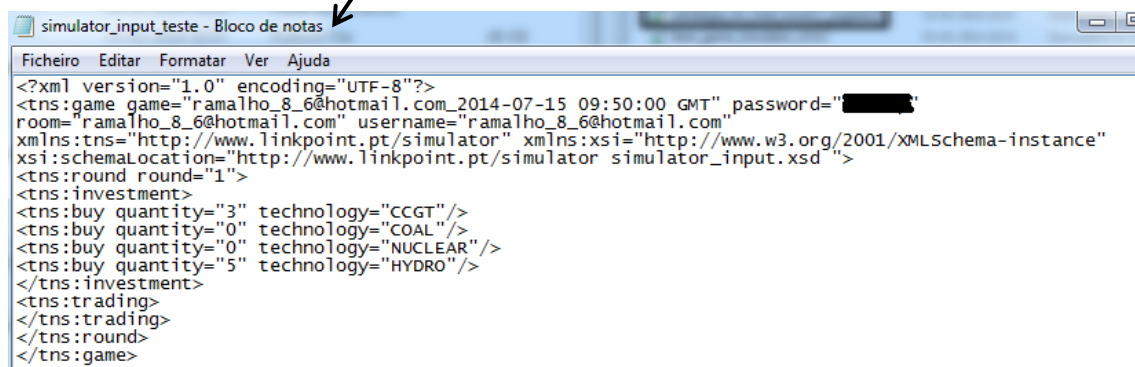
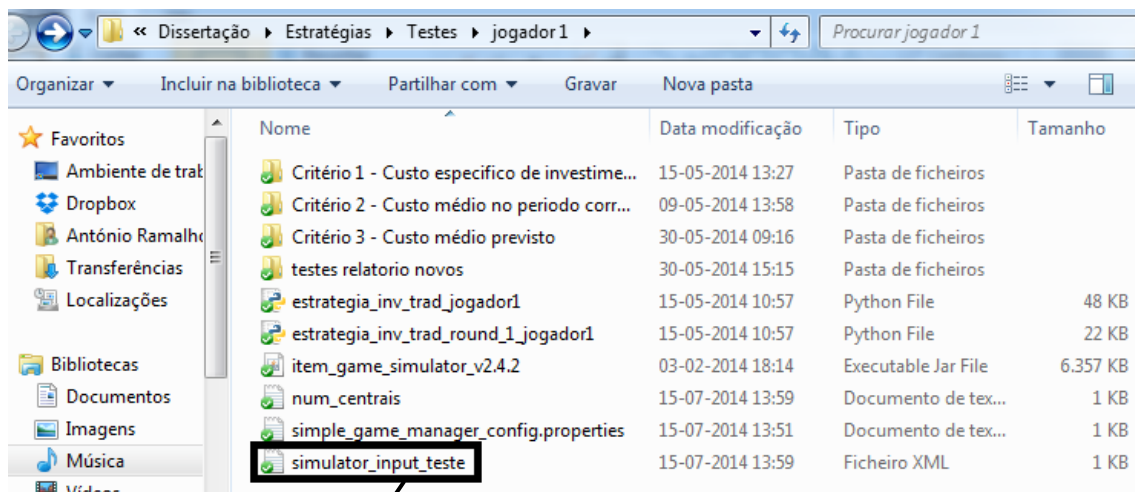
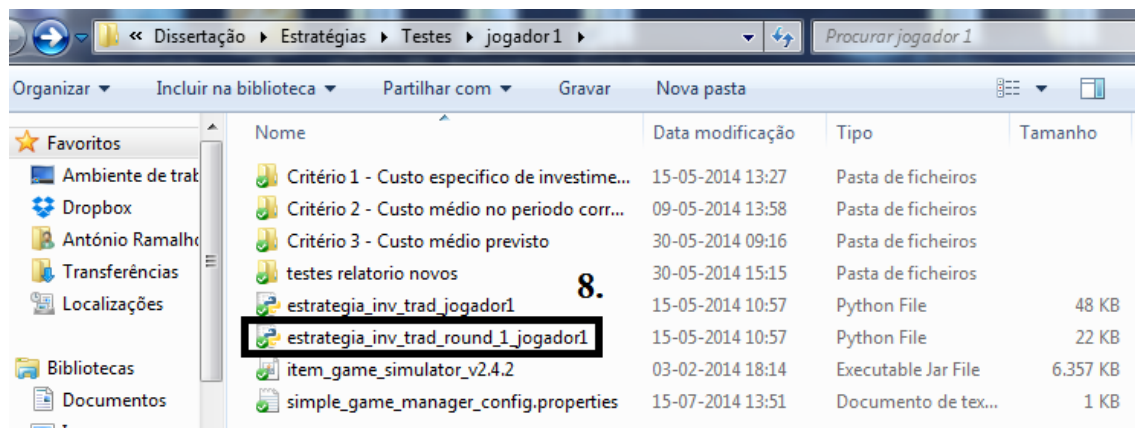


Game created!

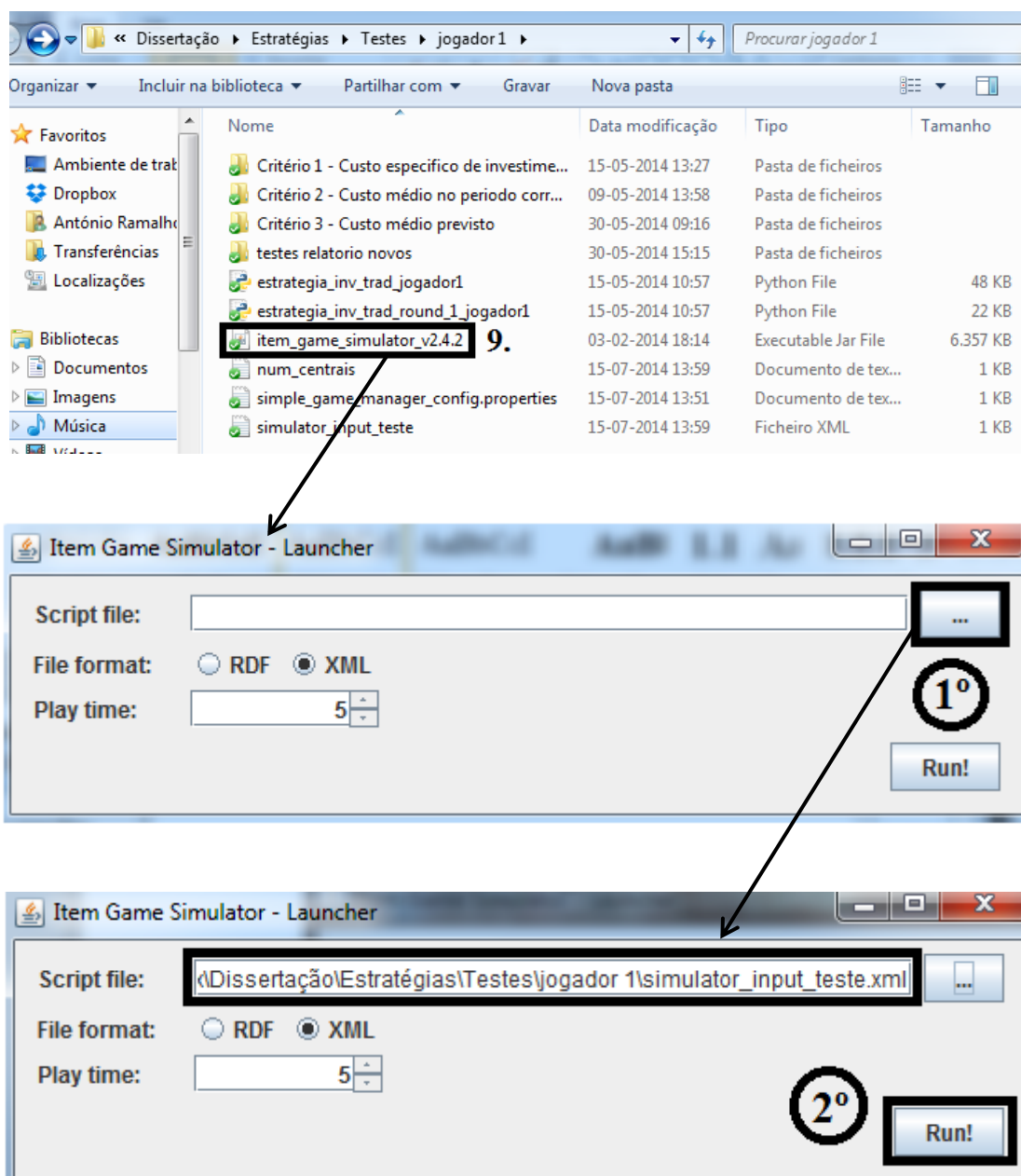
7. Foi criado um ficheiro de formato txt com o nome de “simple\_game\_manager\_config.properties” que contém os dados iniciais. Clicar duas vezes sobre o ficheiro, e tendo o ficheiro aberto é necessário indicar quais os dados considerados no ponto 6.



8. Clicando no ficheiro “estrategia\_inv\_trad\_round\_1\_jogador1”, criado na linguagem de programação *python*, este cria um ficheiro de formato txt com o nome “simulador\_input\_teste”. Este ficheiro tem a informação a enviar ao simulador para a primeira ronda.

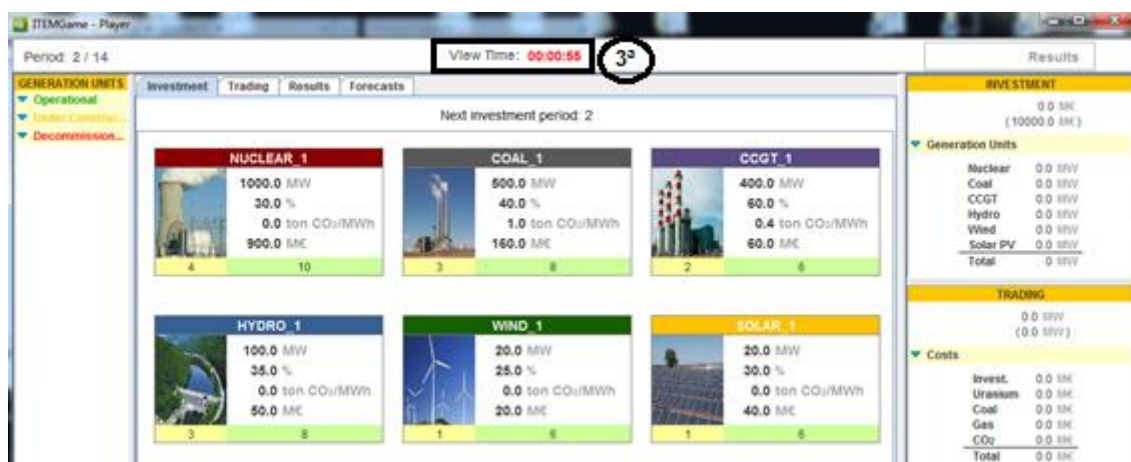
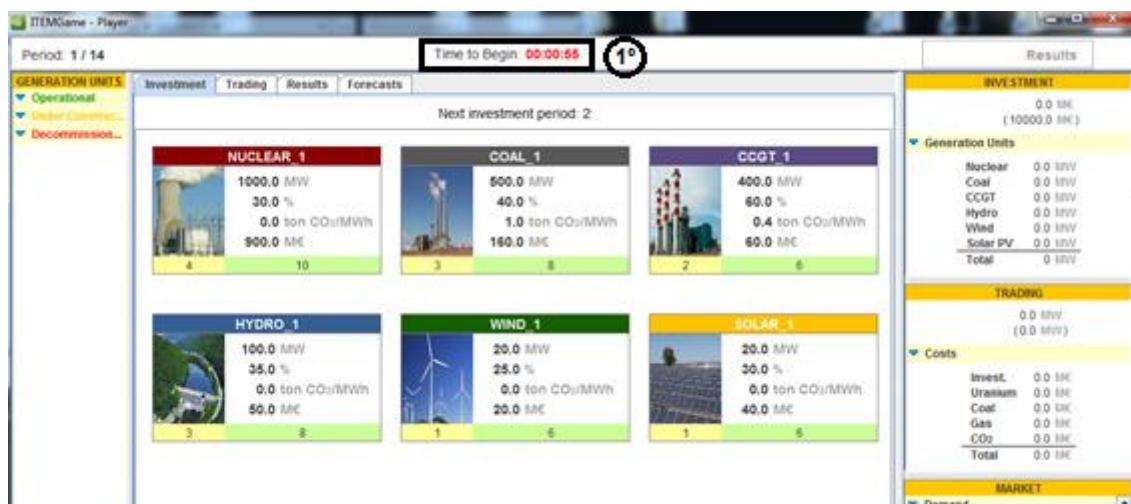


9. Para fazer a interação entre o ficheiro “simulador\_input\_teste” e o jogo é necessário abrir o executador “item\_game\_simulator\_v2.4.2” (este ficheiro não é disponibilizado para *download* no site do ITEM-Game). Na janela que aparece é necessário, primeiro, indicar a localização do ficheiro, e, segundo, tendo a sua localização carregar em “Run!” e a plataforma do jogador inicia-se de seguida.

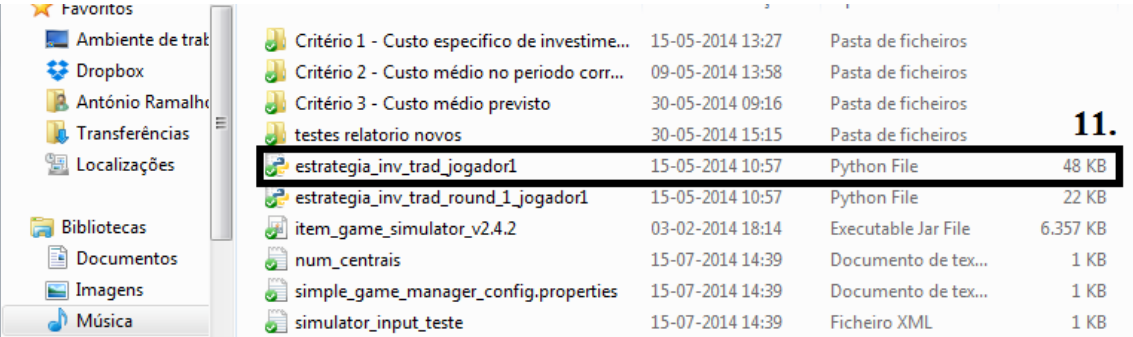




10. A plataforma do jogador inicia e é possível observar qual o tempo para o começo do jogo (“Time to Begin”). Ultrapassado este tempo, “Time to Begin”, começa outro, “Play Time”, onde é possível realizar as decisões estratégicas, que por sua vez são feitas automaticamente uma vez que se utilizou um executorador (“item\_game\_simulator\_v2.4.2”). De seguida entra o tempo de visualização, “View Time”, e neste são apresentados os resultados da ronda que se jogou.

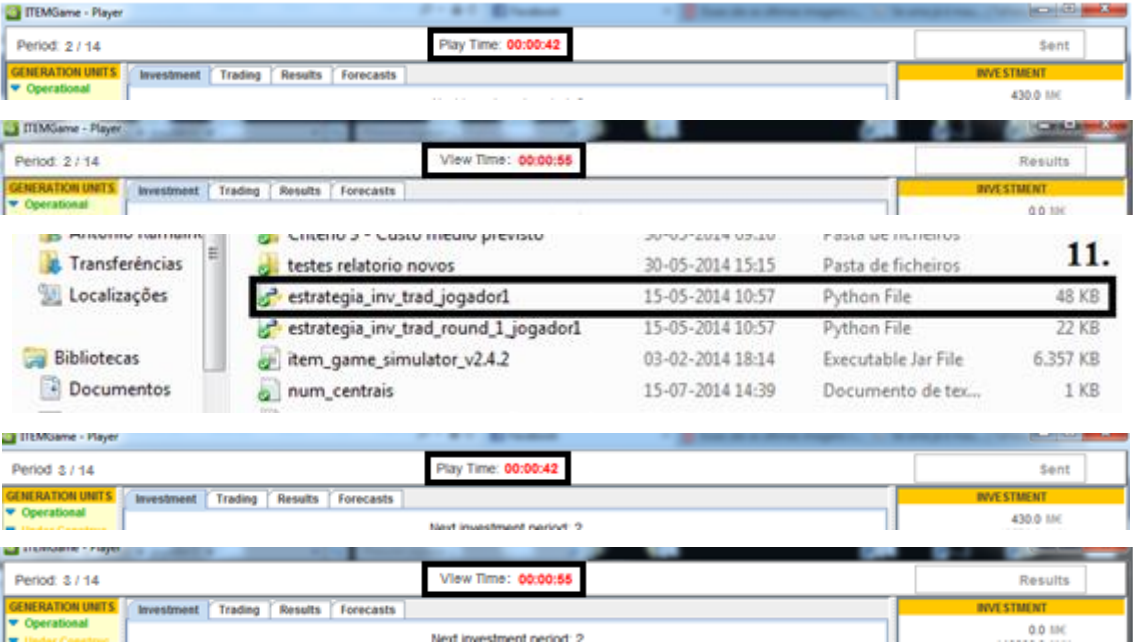


11. Quando o jogo estiver durante o tempo de visualização, “View Time”, é necessário enviar para a próxima ronda as decisões estratégicas segundo os resultados do mercado no período corrente. Para isso é preciso clicar duas vezes no ficheiro “estrategia\_inv\_trad\_jogador1”, e este vai atualizar a informação do ficheiro “simulator\_input\_teste”. Acabando este “View Time”, passar-se-á para o “Play Time”, onde como referido anteriormente a jogada é realizada automaticamente, e regressa novamente o “View Time” onde é necessário correr novamente o ficheiro “estrategia\_inv\_trad\_jogador1”, e este processo tem de se repetir até ao final da simulação.



Crítério 1 - Custo específico de investime...	15-05-2014 13:27	Pasta de ficheiros	
Crítério 2 - Custo médio no periodo corr...	09-05-2014 13:58	Pasta de ficheiros	
Crítério 3 - Custo médio previsto	30-05-2014 09:16	Pasta de ficheiros	
testes relatorio novos	30-05-2014 15:15	Pasta de ficheiros	
<b>estrategia_inv_trad_jogador1</b>	15-05-2014 10:57	Python File	48 KB
estrategia_inv_trad_round_1_jogador1	15-05-2014 10:57	Python File	22 KB
item_game_simulator_v2.4.2	03-02-2014 18:14	Executable Jar File	6.357 KB
num_centrais	15-07-2014 14:39	Documento de tex...	1 KB
simple_game_manager_config.properties	15-07-2014 14:39	Documento de tex...	1 KB
simulator_input_teste	15-07-2014 14:39	Ficheiro XML	1 KB

A sequência é a seguinte:



(...)



# Anexo B

## Exemplo de aplicação do modelo descrito no capítulo 3

### Condições iniciais:

- Período  $t = 1$ ;
- Jogadores  $n = 2$ ;
- Consumo inicial  $D_0 = 1400\text{MW}$ ;
- Quota alvo dos jogadores  $A = 50\%$ ;
- Jogador 1 e Jogador 2 têm cada um uma central CCGT  $P_G = 400\text{MW}$  (Períodos de operação  $OP_G = 6$ ) e uma central hídrica  $P_H = 35\text{MW}$  (Períodos de operação  $OP_H = 10$ );
- Os preços iniciais dos combustíveis e emissões de  $\text{CO}_2$  são iguais aos referidos na Tabela 3.2.3.1;

De seguida será apresentada a decisão estratégica, investimento e comercialização, do jogador 1:

### 1º Passo – Cálculo da potência alvo $P_t^A$

$$P_t^A = A \cdot D_{t+4} - P_{t+4}^{\text{Op}}$$

Em que:

$$A = \frac{50}{100} = 0,5$$

$$D_{t+4} = D_5 = D_0 \cdot (1 + 0,05)^5 = 1787\text{MW}$$

$$P_{t+4}^{\text{Op}} = P_5^{\text{Op}} = \sum_{i=1}^2 P_{i,5} = 400 + 35 = 435\text{MW}$$

$$P_1^A = A \cdot D_5 - P_5^{\text{Op}} = 0.5 \cdot 1787 - 435 = 459\text{MW}$$

## 2º Passo – Escolha da estratégia e cálculo da ordem de mérito na decisão de investimento

A estratégia escolhida para este exemplo de cálculo é a estratégia 2 – custo médio no período corrente.

$$C_{i,t}^M = C_{i,t}^{Inv} + C_{i,t}^{Comb} + C_{i,t}^{CO2} = \frac{I_i}{OP_i \cdot P_i \cdot 8766} + \frac{\pi_t^{Comb}}{\eta_i} + \pi_t^{CO2} \cdot SE_i$$

$$C_{N,1}^M = \frac{900 \cdot 10^6}{10 \cdot 1000 \cdot 8766} + \frac{1}{0,3} + 2 \cdot 0 = 13,6 \text{ €/MWh}$$

$$C_{C,1}^M = \frac{160 \cdot 10^6}{8 \cdot 500 \cdot 8766} + \frac{4}{0,4} + 2 \cdot 1 = 16,6 \text{ €/MWh}$$

(...)

$$C_{S,1}^M = \frac{40 \cdot 10^6}{6 \cdot (20 \cdot 0,3) \cdot 8766} + 0 + 2 \cdot 0 = 126,8 \text{ €/MWh}$$

Ordem de mérito consoante o custo médio no período corrente

Tecnologia	$C_{i,t}^M$ (€/MWh)
Nuclear	13,6
Carvão	16,6
CCGT	18,7
Hídrica	20,4
Eólica	76,1
Solar	126,8

## 3º Passo – Número de centrais necessárias $n_{i,t}$ para preencher a potência alvo $P_t^A$

$$n_{i,t} = \min \left( n_{i,t}^P = \frac{\Delta P}{P_i}; n_{i,t}^I = \frac{O_t}{I_i} \right)$$

$$\Delta P = P_t^A - \sum_{i=1}^6 n_{i,t} \cdot P_i \quad P_t^A \cdot 1.1 \geq \sum_{i=1}^6 n_{i,t} \cdot P_i$$

Primeira iteração:

$$P_1^A = 459 \text{ MW}$$

$$n_{i,1} = 0 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^6 n_{i,1} \cdot P_i = 0$$

$$\Delta P = P_1^A - \sum_{i=1}^6 n_{i,1} \cdot P_i = 459 \text{ MW}$$

Ordem de mérito: N; C; G; H; E; S

$$n_{N,1} = \min \left( n_{N,1}^P = \frac{459}{1000}; n_{N,1}^I = \text{irrestrito} \right) = \min \left( n_{N,1}^P = 0; n_{N,1}^I = \infty \right) = 0$$

$$n_{C,1} = \min \left( n_{C,1}^P = \frac{459}{500}; n_{C,1}^I = \text{irrestrito} \right) = \min \left( n_{C,1}^P = 1; n_{C,1}^I = \infty \right) = 1$$

$$n_{C,1} = 1 \Leftrightarrow \sum_{i=1}^6 n_{i,1} \cdot P_i = n_{C,1} \cdot P_C = 1 \cdot 500 = 500 \text{ MW}$$

Se a seguinte condição for verdadeira, o algoritmo não avança para a segunda iteração. Se for falsa, é necessário repetir o que foi feito na primeira iteração até que a potência alvo seja totalmente preenchida.

$$P_1^A \cdot 1.1 \geq \sum_{i=1}^6 n_{i,1} \cdot P_i \Leftrightarrow 459 \cdot 1.1 \geq 500 \Leftrightarrow 505 \geq 500 \text{ (Verdadeiro)}$$

#### 4º Passo – Decisão de investimento

$$DI_{i,t} = \{n_N \quad n_C \quad n_G \quad n_H \quad n_E \quad n_S\}_t$$

$$n_{C,1} = 1 \text{ (1 central de Carvão)}$$

$$DI_{i,1} = \{0 \quad 1 \quad 0 \quad 0 \quad 0 \quad 0\}_1$$

**5º Passo – Decisão de comercialização**

$$Q_{i,t} = P_{i,t}$$

$$\pi_{i,t} = C_{i,t}^M = C_{i,t}^{Inv} + C_{i,t}^{Comb} + C_{i,t}^{CO2}$$

$$DC_{i,t} = \{Q_i \quad \pi_i\}_t$$

Central CCGT:

$$Q_{G,1} = P_{G,1} = 400\text{MW}$$

$$\pi_{G,1} = C_{G,1}^M = 18,7\text{€ / MWh}$$

Central Hídrica:

$$Q_{H,1} = P_{H,1} = 35\text{MW}$$

$$\pi_{H,1} = C_{H,1}^M = 20,4\text{€ / MWh}$$

$$DC_{i,1} = \begin{Bmatrix} Q_G & \pi_G \\ Q_H & \pi_H \end{Bmatrix}_1 \Rightarrow DC_{i,1} = \begin{Bmatrix} 400 & 18,7 \\ 35 & 20,4 \end{Bmatrix}_1$$

# **Anexo C**

**Artigo desenvolvido para a conferência internacional EEM14**

# Investment Focused Strategies in Electricity Markets using the ITEM-Game Simulator

António Ramalho

ISEL/ADESPA  
Lisbon, Portugal  
ramalho\_8\_6@hotmail.com

Jorge A.M. Sousa

ISEL/ADESPA; INESC-ID  
Lisbon, Portugal  
jsousa@deea.isel.ipl.pt

Paulo Trigo

ISEL/ADEETC; LabMAG  
Lisbon, Portugal  
ptrigo@deetc.isel.ipl.pt

**Abstract** — This paper presents a methodology to establish investment and trading strategies of a power generation company. These strategies are integrated in the ITEM-Game simulator in order to test their results when played against defined strategies used by other players. The developed strategies are focused on investment decisions, although trading strategies are also implemented to obtain base case results. Two cases are studied considering three players with the same trading strategy. In case 1, all players also have the same investment strategy driven by a market target share. In case 2, player 1 has an improved investment strategy with a target share twice of the target of players 2 and 3. Results put in evidence the influence of the CO<sub>2</sub> and fuel prices in the company investment decision. It is also observed the influence of the budget constraint which might prevent the player to take the desired investment decision.

**Keywords** -- electricity markets, generation companies, investment strategies, ITEM-Game simulator.

## Nomenclature

$t$	Time period	$C_t^{CO_2}$	CO <sub>2</sub> cost at period $t$
$I$	Investment	$C_t^{fuel}$	Fuel cost at period $t$
$OP$	Operational period	$B_t$	Budget at period $t$
$P$	Plant capacity	$\pi_t$	Profit at period $t$
$\eta$	Plant efficiency	$R_t$	Revenue at period $t$
$SE$	Specific CO <sub>2</sub> emissions	$C_t$	Cost at period $t$
$T$	Target share	$D_t$	Demand at period $t$
$n$	Number of players	$P_t^T$	Target capacity at period $t$
$C^W$	Specific investment cost	$TP_t$	Total market capacity at period $t$
$S_t^{CO_2}$	CO <sub>2</sub> price at period $t$	$C_t^T$	Total cost at period $t$
$S_t^{fuel}$	Fuel price at period $t$	$E_t$	Deviation at period $t$
$V_t^{CO_2}$	CO <sub>2</sub> emissions at period $t$	$P_t^I$	Capacity invested at period $t$
$V_t^{fuel}$	Fuel consumption at period $t$	$RM_t$	Reserve margin at period $t$
$\alpha$	Multiplicative factor	$CS_t$	Capacity share at period $t$
$C_t^{inv}$	Investment cost at period $t$	$AP_t$	Operational capacity at period $t$

## I. INTRODUCTION

The liberalization of electricity markets brought difficulties and opportunities for market agents since the increased complexity and competitiveness in the pool model raises also the need to understand the interactions between the various participants and its impact on market behavior [1].

In this context, new opportunities and challenges are created for various agents, particularly in terms of risk sharing to the extent that producers and trading companies are taking

increasing risks inherent to their investment and trading decisions. Therefore, it is more and more important to define investment and trading strategies that takes into account, not only the expected return, but also the assumed risk [2].

In particular, investment decisions have a strong impact on the long-term results of power companies, as they determine the future generation portfolio and the more or less exposure to certain risk factors such as fuel and CO<sub>2</sub> prices, power demand, renewable generation evolution, among others [2]-[3].

CCGT technology has relatively low capital cost, short lead time, standardized design and, for some technologies, flexibility in operation which provide significant advantages to investors. On the other hand, natural gas price uncertainty remains a large risk to the investor. Nuclear power plants, by contrast, have a relatively low marginal cost of fuel and operating costs but the investment capital cost is very high. Coal power projects tend to become more capital-intensive to take advantage of economies of scale, to meet tighter environmental standards more economically, and to improve fuel efficiency. As with nuclear plants, lead and construction times for coal-fired power plants can be long [2]-[3].

The renewables plants, hydro, solar and wind capacity are also capital-intensive. Some of these technologies have some very attractive low-risk characteristics, including very short lead times, no fuel costs or emissions, and low operating costs. However, the variability of the output power reduces the value of their generation [2]-[3].

Regarding trading decisions, it is particularly relevant the choice of form and terms of negotiation, as well as the strategies pursued in organized markets where firms compete to sell their generation at the most attractive price [4]-[5].

This paper presents a methodology to establish investment and trading strategies of a power generation company. These strategies are integrated in the ITEM-Game simulator in order to test results when played against other defined strategies used by other players. The developed strategies are focused on investment decisions, although trading strategies are also implemented to obtain base case results.

## II. ITEM-GAME SIMULATOR

### A. Description

The platform ITEM-Game (Investment and Trading in Electricity Markets Game) is a simulator of electricity markets where several participants (players) can interact. In this simulator, each player represents a power generation company that can invest in different power generation technologies, trade capacity in a marginal power pool and analyze market outcomes. The electricity demand increases over time at a given rate. The fuels (uranium, coal, gas) and CO<sub>2</sub> prices are

endogenous, changing according to the total fuel consumption and CO<sub>2</sub> emissions in each game period. Each game is composed of ten rounds (periods), each representing a time period of one year (8766 hours). At the end, wins the player with the highest profit [6]-[7].

### B. Investment and trading decisions

In the ITEM-Game there are different generation technologies available for investment: Nuclear, Coal, CCGT, Hydro, Wind and Solar. To invest in these plants budget is needed. For each technology it is provided information about capacity, efficiency (for thermals) or capacity factor (for renewables), CO<sub>2</sub> specific emissions, investment price, construction and operation periods [6]. Table I presents these characteristics for the possible investment choices.

Table I – Characteristics of the different power plants available for investment in ITEM-Game

Technology	Nuclear	Coal	CCGT	Hydro	Wind	Solar
Capacity (MW)	1000	500	400	100	20	20
Efficiency (%)	30	40	60	-	-	-
Cap. Factor (%)	-	-	-	35	25	30
CO <sub>2</sub> emission (ton CO <sub>2</sub> /MWh)	-	1	0.4	-	-	-
Investment (M€)	900	160	60	50	20	40
Construction periods	4	3	2	3	1	1
Operational periods	10	8	6	8	6	6

Regarding trading decisions, companies make offers to a power pool taking into account the available capacity and considering the different costs associated with power generation. The supply offers of pair quantity/price are traded in a marginal power pool and these supply offers are dispatched until demand is satisfied [6]. The demand curve is inelastic and has a growing rate of 5% in each period. In Fig. 2 is shown a trading example.



Fig. 2 – Trading example in market clearing price model

### C. Models and results

At the beginning of each game, all players have an initial budget of 200 M€. The initial budget decreases whenever investments are not covered by current profits. If the profit in period  $t$  is negative, the budget is null [6].

The prices of CO<sub>2</sub> emissions and fuel (uranium, coal and gas) vary from period to period depending on the volume of

the respective variable, e.g., if there are many CCGT generation dispatch in a given period, the price of gas will increase in the following period.

In (1) and (2) are calculated the fuel and CO<sub>2</sub> emissions prices where  $S_0^{\text{fuel}}$  and  $S_0^{\text{CO}_2}$  are initial fuel and CO<sub>2</sub> prices,  $\alpha^{\text{fuel}}$  and  $\alpha^{\text{CO}_2}$  are a multiplicative factor,  $V_t^{\text{fuel}}$  is the fuel consumption at period  $t$  and  $V_t^{\text{CO}_2}$  are the CO<sub>2</sub> emissions at period  $t$ .

$$S_{t+1}^{\text{fuel}} = S_0^{\text{fuel}} + \alpha^{\text{fuel}} \cdot V_t^{\text{fuel}} \quad (1)$$

$$S_{t+1}^{\text{CO}_2} = S_0^{\text{CO}_2} + \alpha^{\text{CO}_2} \cdot V_t^{\text{CO}_2} \quad (2)$$

The plant total cost is calculated as the sum of fixed and variable costs. The fixed cost is set by the cost of investment, i.e., the cost of operation period. Equation (3) shows the investment cost where  $C_t^{\text{inv}}$  is the investment cost,  $I$  is investment of each power plant unit,  $OP$  is the number of periods in which the plant is operational and  $P$  is the plant capacity.

$$C_t^{\text{inv}} = I / (OP \cdot P \cdot 8766) \quad (3)$$

The plant variable cost is the sum of CO<sub>2</sub> emissions and fuel costs. Equations (4) and (5) shows these costs where  $C_t^{\text{fuel}}$  is the fuel cost at period  $t$ ,  $S_t^{\text{fuel}}$  is the fuel price (uranium, coal or gas),  $\eta$  is the power plant efficiency,  $C_t^{\text{CO}_2}$  is the CO<sub>2</sub> cost at period  $t$ ,  $S_t^{\text{CO}_2}$  is the CO<sub>2</sub> price and  $SE$  is the power plant specific CO<sub>2</sub> emissions.

$$C_t^{\text{fuel}} = S_t^{\text{fuel}} / \eta \quad (4)$$

$$C_t^{\text{CO}_2} = S_t^{\text{CO}_2} \cdot SE \quad (5)$$

Results are displayed at the end of each period. Profit ( $\pi_t$ ) is calculated from the difference between revenues ( $R_t$ ) and costs ( $C_t$ ) at period  $t$ , defined in (6).

$$\pi_t = R_t - C_t \quad (6)$$

### D. Interaction between ITEM-Game and Python

To perform the strategies it is necessary to read the results of each round. At the end of each round, the ITEM-Game simulator writes an output file, in XML format, with the relevant results concerning that round. The ITEM-Game results are interpreted with a market knowledge model that implements the investment and trading strategies using Python programming language. As a result, it is created an input file with the strategic investment and trading decisions to be played in the next round. Fig. 3 shows the overall simulation process.

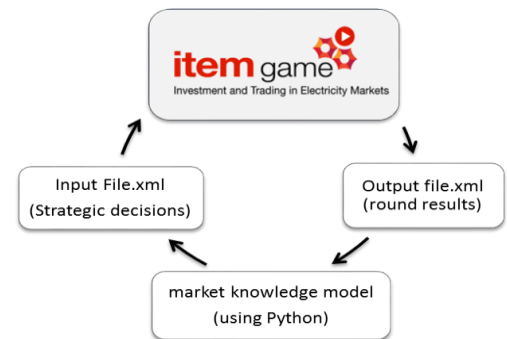


Fig. 3 - Interaction process between the ITEM-Game and the implemented strategies

## Anexo C

The information, provided in the output file, necessary to make the strategic decisions includes prices (CO<sub>2</sub>, uranium, coal, gas), budget, power plant information, operational capacity plants, number of players and demand.

### III. MARKET STRATEGIES

This section presents the methodology for two strategies, one for investment and other for trading. Investment strategy methodology uses a target capacity to investment decision, and trading strategy methodology uses the market share for selling offers.

#### A. Investment strategy

The methodology used in the investment strategy takes into account a market share target, i.e. the installed capacity of the company is a percentage of the total capacity available in the market, which depends of the number of players. The parameter that will change from game to game is the percentage that is intended for target share (T) and will be studied the effect in company profit. The strategy includes the following steps:

**Step 1** – Taking into account the power plant construction time, an analysis is carried out for the following four periods. Considering the demand (D<sub>t</sub>) and the operational capacity (AP<sub>t</sub>) it is calculated the target capacity market (P<sup>T</sup><sub>t</sub>), defined in (7). The strategy objective is to achieve the capacity required in period t+4.

$$P_t^T = T \cdot D_{t+4} - AP_{t+4} \quad (7)$$

In (8) is calculated the target share, where n is the number of players:

$$T = 1/n \cdot 100 \quad (8)$$

**Step 2** – The target capacity for period t+4 can be accomplished by several units of each plant technology. It was taken into account, such as the restriction of these options, the specific investment cost. This cost gives information about the technology that provides more capacity at the least investment cost. This cost is calculated according to (9), where I is the investment and P is the power plant capacity.

$$C^W = I/P \quad (9)$$

**Step 3** – Next is made all the possible combinations, which, taking into account the specific investment cost and target capacity for period t+4, is calculated the invested capacity of each technology (P<sup>I</sup><sub>t</sub>), the total cost of the option (C<sup>T</sup><sub>t</sub>) and the deviation (E<sub>t</sub>) between the invested capacity (P<sup>I</sup><sub>t</sub>) and capacity needed (P<sup>N</sup><sub>t</sub>).

The invested capacity of each technology (P<sup>I</sup><sub>t</sub>) calculation has the following methodology:

- 1) For each combination, the target capacity for period t+4 is filled by technology capacity blocks that has the lowest specific investment cost, and is discounted to the budget;
- 2) If capacity is missing to fill, and there is not enough budget to invest in the technology with the lowest specific investment cost, investment goes to the technology with the second lowest specific investment cost, and so on.

The total cost of the option (C<sup>T</sup><sub>t</sub>) is calculated using (10) where C<sup>T</sup><sub>t</sub> is total cost of the option at period t, P<sup>I</sup><sub>t,i</sub> is the invested capacity of technology i at period t.

$$C_t^T = \sum_{i=1}^6 (C_{t,i}^{inv} + C_{t,i}^{fuel} + C_{t,i}^{CO_2}) \cdot P_{t,i}^I \quad (10)$$

The deviation (E<sub>t</sub>) between target capacity and invested capacity is calculated for the four periods. Equation (11) indicates how the deviation is calculated.

$$E_t = \sum_{j=1}^4 T \cdot D_t - (AP_t + P_{t,j}^I) \quad (11)$$

**Step 4** – Finally, of all the options calculated in the previous step are selected those that most closely match the target capacity for period t+4, and is chosen the one that has the lowest total cost. If there is more than one with the lowest total cost, it is chosen the one that has the smallest deviation.

#### B. Trading strategy

As a complete strategy in the ITEM-Game includes trading decisions, it is therefore necessary to implement a trading strategy. This strategy, called the base strategy, is the same used in all simulations by all players.

In this strategy offers are made taking into account the current capacity share and these two situations: If the supply is less or equal than demand (RM<sub>t</sub> ≤ 0); If the supply is greater than demand (RM<sub>t</sub> > 0). In the situation where RM<sub>t</sub> > 0 is also taken into account the percentage of company operational capacity. In (12) and (13) are calculated the reserve margin and the capacity share, respectively.

$$RM_t = TP_t - D_t \quad (12)$$

$$CS_t = AP_t / (D_t + RM_t) \quad (13)$$

The company can have several power generation units, and company trading decisions have the following methodology:

- RM<sub>t</sub> ≤ 0

If CS<sub>t</sub> ≤ 1/n, all company capacity is offered at a price equal to total costs. If 1/n ≤ CS<sub>t</sub> ≤ 50%, all company capacity is offered at a price equal to twice total costs with a maximum offer price of 180 €/MWh. If CS<sub>t</sub> > 50%, all company capacity is offered at the maximum offer price of 180 €/MWh.

- 0 < RM<sub>t</sub> ≤ 40% of operational capacity

If CS<sub>t</sub> ≤ 1/n, all company capacity is offered at a price equal to marginal costs. If 1/n ≤ CS<sub>t</sub> ≤ 50%, a selling offer is made using the highest cost technology with a quantity equal to the reserve margin at an offer price of 180 €/MWh. This offer intends to set a high pool price. The remaining capacity is offered at a price equal to total costs. If CS<sub>t</sub> > 50%, all company capacity is offered at the maximum offer price of 180 €/MWh.

- RM<sub>t</sub> > 40 % of operational capacity

If CS<sub>t</sub> ≤ 1/n, all company capacity is offered at price equal to marginal costs. If 1/n ≤ CS<sub>t</sub> ≤ 50%, all company capacity is offered at a price equal to twice the marginal costs. If CS<sub>t</sub> > 50%, as total market capacity is significantly higher than demand (RM<sub>t</sub> > 40 % of company capacity), the goal of this strategy, given that the company has over 50% capacity installed, is offer all company capacity to price equal to twice total costs.



## IV. RESULTS

In this section, using two cases, numerical simulations are conducted to illustrate the effects of the proposed strategies in company profit. In both cases, three players are considered, all playing the same trading strategy. In case 1, all players also have the same investment strategy. In case 2, player 1 has an different investment strategy with a target share twice ( $T = 66,6\%$ ) the target of players 2 and 3 ( $T = 33,3\%$ ). It is also important to note, for the two studied cases, the budget depends on the profit for each period, so is an investment restriction and it is common to all players.

## A. Case 1 – All players with the same strategy

In case 1 all the three players use the same investment and trading strategies. The simulation results are presented in Fig. 4 and Table II. Fig. 4 shows the total market capacity with reference to the capacity of each technology, the demand and the market clearing price over the ten periods.

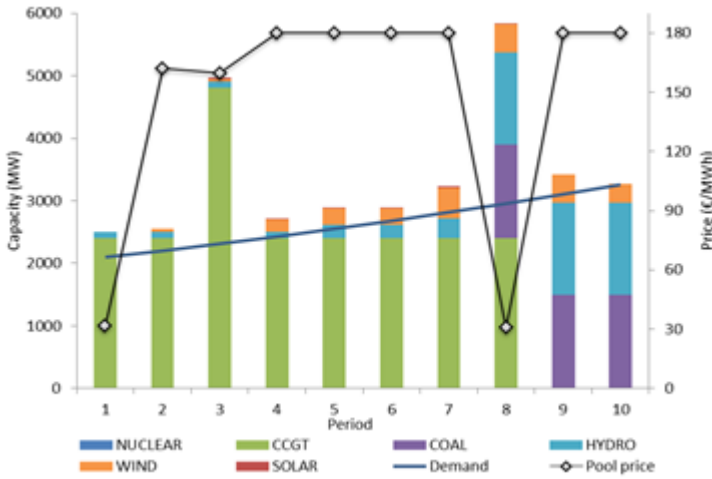


Fig. 4 - Case 1: Total market capacity, demand and pool price

Table II presents the investment decisions of player 1, which are the same for players 2 and 3. As strategies used by the 3 players are the same, the results are also the same. First column presents the periods, second column the budget, third column the target capacity for period  $t+4$ , fourth column the technologies by merit order of total cost (N-Nuclear, G-CCGT, C-Coal, H-Hydro, W-Wind and S-Solar), fifth column the investment decision and the sixth column the profit in each period.

Table II - Case 1: Player 1 investment decisions

Period	$B_t$ (M€)	$P_t^T$ (MW)	Merit order	Investment Decision	Profit (M€)
1	200	898	N; C; G; H; W; S	2 CCGT; 3 Wind	75
2	95	48	N; H; C; W; G; S	1 Hydro; 1 Solar	521
3	541	52	N; H; C; W; G; S	10 Wind	516
4	521	65	N; H; C; W; G; S	1 Hydro; 5 Wind	710
5	716	940	N; H; C; W; G; S	1 Coal; 11 Hydro	787
6	793	78	N; H; C; G; W; S	15 Wind	836
7	842	0	N; H; C; W; G; S		893
8	898	0	N; C; H; G; W; S		-14
9	0	0	N; G; H; C; W; S		1294
10	1300	0	N; H; G; C; W; S		1369

In period 3, despite the installed capacity being much higher than the demand, the pool price does not decrease significantly. This happens because in period 3 the capacity from CCGT plants (800 MW per player) were offered at a price of the double their marginal costs (159.6 €/MWh), so all the offers matching and set the pool price. On the other hand, in period 8, as shown in Fig. 4, the total market capacity is not dominated by CCGT plants. In this situation, the CCGT capacity is not dispatched because their offer price is 128.6 €/MWh, well above the market price of 30.8 €/MWh, set by the coal power plants.

By examining the profit, it is observed an increase over the periods, except in period 3 and 8, the periods with a significant reserve margin. In the initial periods, although the Coal technology has the lowest total costs, the investment decisions are focused on the CCGT technology. This is due to its low specific investment which makes the capacity target achievable within the available budget. As the game evolve, budget increases and, in period 5, there is already enough budget to invest in Coal. Therefore, the portfolio of plants is more balanced in period 8, and in periods 9 and 10 there are no longer CCGT power plants in operation.

## B. Case 2 – Player 1 with different investment strategy

In this case the target share of player 1 is twice ( $T = 66,6\%$ ) the target of players 2 and 3. Fig. 5 shows the total market capacity, the demand and the market clearing price over the ten periods.

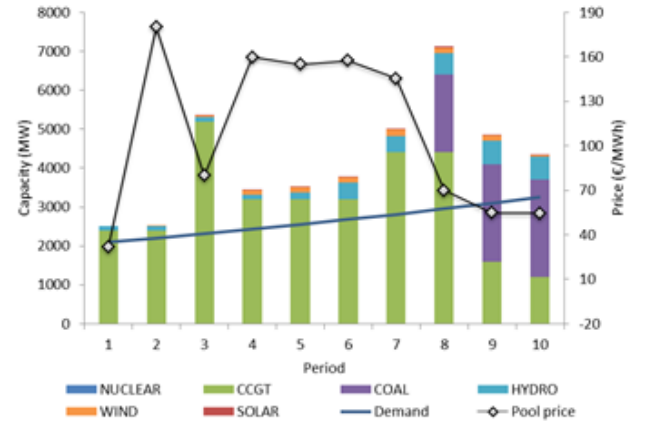


Fig. 5 - Case 2: Total market capacity, demand and pool price

Fig. 6 shows the company installed capacity, divided by technology, and profits. The results from player 2 and 3 are identical as they play the same strategy. Table III shows the results of investment decisions of player 1 and Table IV shows results for the investment decisions of player 2 and 3.

It is noted that period 5 was decisive for the final outcome. In this period Nuclear and Hydro plants have the lowest total cost but player 1 does not have enough budget to achieve its target capacity with this technologies. After, Nuclear and Hydro, Coal has the lowest total cost. However, with a more ambitious capacity target (twice as much as the other players), player 1 does not have enough budget to invest in three Coal power plants (1500 MW), and its decision is CCGT, which has a lower specific investment. On the other hand, as their capacity targets are lower, players 2 and 3 have enough budget to invest in two Coal power plants.

## Anexo C

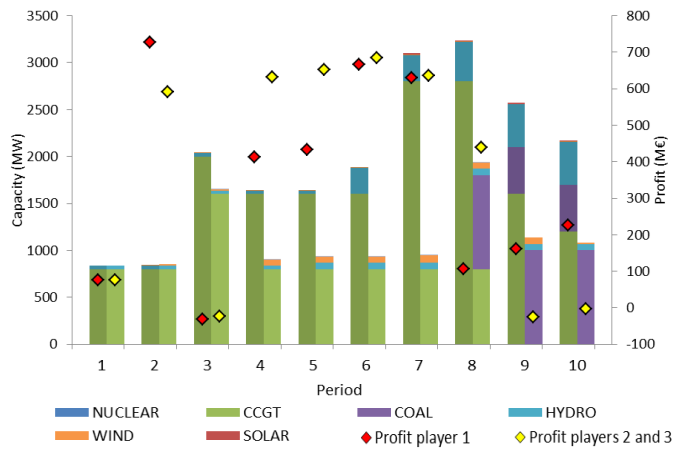


Fig. 6 - Company capacity by technology and profit of players 1, on left bars, and player 2 and 3, on the right bars

Table III - Case 2: Player 1 investment decisions

Period	$B_t$ (M€)	$P_t^T$ (MW)	Merit order	Investment Decision	Profit (M€)
1	200	1834	N; C; G; H; W; S	3 CCGT; 1 Wind	75
2	75	602	N; H; C; W; G; S	1 CCGT	728
3	728	260	N; H; C; W; G; S	7 Hydro	-31
4	0	99	N; H; C; W; G; S		411
5	411	1527	N; H; C; W; G; S	3 CCGT; 4 Hydro; 1 Wind	432
6	432	602	N; H; C; W; G; S	1 Coal; 1 Hydro; 2 Solar	667
7	667	0	N; C; H; G; W; S		629
8	629	0	N; C; H; G; W; S		106
9	106	0	N; H; G; C; W; S		160
10	160	0	N; H; G; C; W; S		225

Table IV - Case 2: Player 2 and 3 investment decisions

Period	$B_t$ (M€)	$P_t^T$ (MW)	Merit order	Investment Decision	Profit (M€)
1	200	898	N; C; G; H; W; S	2 CCGT; 3 Wind	75
2	95	48	N; H; C; W; G; S	1 Hydro; 1 Solar	591
3	597	52	N; H; C; W; G; S	10 Wind	-23
4	0	65	N; H; C; W; G; S		632
5	637	1006	N; H; C; W; G; S	2 Coal	652
6	657	18	N; H; C; W; G; S	3 Wind	684
7	689	0	N; C; H; G; W; S		636
8	641	0	N; C; H; G; W; S		439
9	444	0	N; H; G; C; W; S		-26
10	0	0	N; H; G; C; W; S		-3

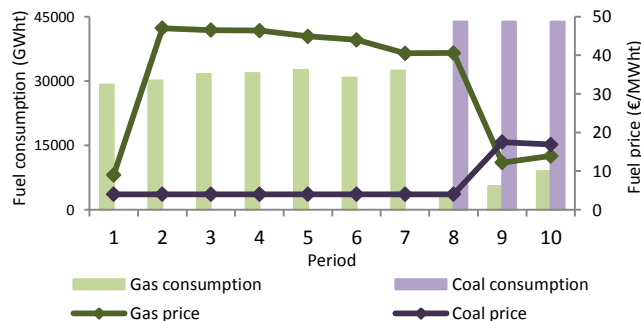


Fig. 7 – Fuel consumption and fuel price

From Fig. 6, it is observed that player 2 and 3 have a higher profit between period 3 and 8 but, in last two rounds, the player 1 presents more profit.

This is due to period 5 decisions, as previously explained, when player 1 invested in CCGT plants while player 2 and 3 invested in Coal plants. In the last two periods, the coal price is higher than the gas price, Fig. 6, which gives an advantage to player 1 which has also a greater installed capacity and sets the pool price, becoming the game winner.

## V. CONCLUSIONS

In this paper, investment and trading strategies of a generation company are presented. The developed strategies are focused on investment decisions, although trading strategies are also implemented to obtain base case results. These strategies are integrated in the ITEM-Game simulator in order to test their results when played against other strategies used by the other players.

Two cases are studied using three players, all with the same trading strategy. In case 1, all players also have the same investment strategy which takes into account a balanced market share target. In case 2, player 1 has an improved investment strategy with a target share twice the target of players 2 and 3.

For the implemented strategies, results identify the influence of CO<sub>2</sub> and fuel prices on the company investment decisions. It is also observed that budget is an important constraint which might prevent a company from taking the least total cost decision, making decisions based on the specific investment cost.

In this paper, the investment decision criteria is based on the total generation costs, computed according to the current period observations. In future work, this criteria will be improved by using forecasts of CO<sub>2</sub> and fuel prices for the period where the power plants become available for operation.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by national funds through FCT – Fundação para a Ciência e Tecnologia, under project Pest-OE/EEI/LA0021/2013 and project PESt-OE/EEI/UI0434/2011.

## REFERENCES

- [1] P. L. Joskow, "Competitive electricity markets and investment in new generating capacity," *MIT Center for Energy and Environmental Policy Research*, 2006.
- [2] "Power Generation Investment in Electricity Markets," [Online]. Available: <http://www.hks.harvard.edu/hepg/Papers/Fraser.gen.invest.elec.mkts.1203.pdf>. [Accessed in 1/3/2014].
- [3] "Projected Costs of Generating Electricity," [Online]. Available: [www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected\\_costs.pdf](http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/projected_costs.pdf). [Accessed in 1 3 2014].
- [4] A. Azadeh, S. F. Ghaderi, B. P. Nokhandan, M. Sheikhalishahi, "A new genetic algorithm approach for optimizing bidding strategy viewpoint of profit maximization of a generation company," *ELSEVIER, Expert Systems with Applications*, vol. 39, n.º 1, p. 1565–1574, Jan. 2012.
- [5] S. Nojavan, K. Zare, M. R. Feyzi, "Optimal bidding strategy of generation station in power market using information gap decision theory (IGDT)," *ELSEVIER, Electric Power Systems Research*, vol. 96, p. 56–63, Mar. 2013.
- [6] J. Sousa, P. Trigo, P. Marques, "ITEM-Game," [Online]. Available: [http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/jsousa/Doc/ITEM2011/ITEM\\_emg.pdf](http://pwp.net.ipl.pt/deea.isel/jsousa/Doc/ITEM2011/ITEM_emg.pdf). [Accessed in 18/2/2014].
- [7] "Investment and Trading in Electricity Markets Game (ITEM-Game)," [Online]. Available: <https://www.item-game.org/>. [Accessed in 1/3/2014].

